

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

par

Hussein Abdel Mohsen HUSSEIN

PREMIÈRE THÈSE :

Étude pétrographique et radiogéologique
de la région située au Nord de Nantes
(Loire-Atlantique)

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

soutenues publiquement le 15 Juin 1959 devant la Commission d'Examen

JURY :

MM. M. ROUBAULT, *Président*

R. COPPENS

G. SADLAN

} *Examineurs*



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555807_0044

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

par

Hussein Abdel Mohsen HUSSEIN

PREMIÈRE THÈSE :

Étude pétrographique et radiogéologique
de la région située au Nord de Nantes
(Loire-Atlantique)

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

soutenues publiquement le 15 Juin 1959 devant la Commission d'Examen

JURY :

MM. M. ROUBAULT, *Président*

R. COPPENS }
G. SADLAN } *Examineurs*



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

ADMINISTRATION :

Doyen : M. URION

Assesseur : M. ECHEVIN

Secrétaire : M. LAPOINTE

HONORARIAT :

Doyens honoraires : MM. CORNUBERT, DELSARTE

Professeurs honoraires : MM. DARMOIS, GUTTON, CROZE, RAYBAUD, FALLOT, LAFFITTE, LERAY, DONZELOT, JOLY, LAPORTE, EICHHORN, CAPELLE, GODEMENT, DUBREIL, SCHWARTZ, DIEUDONNÉ, DE MALLEMANN, LONGCHAMBON, OLMER, DODÉ, GAUTHIER.

Maîtres de conférences honoraires : MM. RAUX, LIENHART.

PROFESSEURS :

MM. CORNUBERT, Chimie organique
CHEVALLIER, Physique
URION, Chimie biologique
DELSARTE, Analyse supérieure
REMY, Zoologie
ROUBAULT, Géologie
GUÉRIN, Chimie industrielle
VEILLET, Biologie animale
ECHEVIN, Botanique
WAHL, Chimie organique industrielle
BARRIOL, Chimie théorique
BIZETTE, Physique

MM. GUILLIEN, Electronique
GIBERT, Chimie phys. et électrochimie
HERVÉ, Calcul diff. et intégral
LEGRAS, Mécanique rationnelle
DAVID, Chimie biologique
BOLFA, Minéralogie
NICLAUSE, Chimie
FAIVRE, Physique appliquée
AUBRY, Chimie minérale
COMOLET, Mécanique physique
DUVAL, Génie chimique
COPPENS, Radiogéologie
LIONS, M. M. P.

MAITRES DE CONFÉRENCES :

MM. WERNER, Botanique
FRÜHLING, Radiotechnique
CAYET, Physiologie
MANGENOT, Phytopathologie
GARNIER, Agronomie
BRUHAT, Mathématiques générales
SADRAN, Géochimie
CHAPON, Chimie biologique
HADNI, Physique
M^{me} ROIZEN, Physique
M. HILLY, Géologie de la Lorraine

MM. MALAPRADE, Chimie
RÉGNIER, Chimie minérale
LE GOFF, Génie chimique
KERN, Minéralogie
WEPPE, Minéralogie appliquée
LERMUSIAUX, Physique de l'état métall.
BERNARD, Géologie
ARAGNOL, Mathématiques (propédeut)
BONVALET, Mathématique appliquée
BASTICK, Chimie
RENARD, Physique théorique et nucléaire

A MA MERE,

A MES SOEURS,

A MES MAITRES,

M. Marcel ROUBAULT,

*Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, Directeur
de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée
et de Prospection Minière.*

M. René COPPENS,

Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy.

M. Riad HIGAZY,

Directeur des Recherches Géologiques et Minières, Le Caire.

Hommage de profonde reconnaissance.

Etude pétrographique et radiogéologique
de la région située au Nord de Nantes
(Loire-Atlantique)

ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE ET RADIOGÉOLOGIQUE DE LA RÉGION SITUÉE AU NORD DE NANTES (LOIRE-ATLANTIQUE)

par Hussein Abdel Mohsen HUSSEIN

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉS	9	AVANT-PROPOS	11
SUMMARY - ZUSAMMENFASSUNG	10	INTRODUCTION	13

Chapitre premier. — ETUDE PETROGRAPHIQUE

INTRODUCTION	15	II. — La bande granitique du NW de Nantes	26
Historique	15	Généralités	26
Description géographique	17	<i>Tectonique</i>	26
Les grandes unités de la région	17	<i>Le granite à deux micas</i>	26
DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES UNITÉS	18	Etudes pétrographiques	26
I. — Le massif de Vigneux-Orvault . . .	18	Minéralisations	27
Généralités	18	Etude chimique	28
<i>Comparaison de ce massif avec d'autres massifs de la région.</i>		III. — Les granites gneissiques	29
<i>Aperçu tectonique</i>	18	Généralités	29
<i>Les différents types de granites.</i>	19	Minéralisations	29
Descriptions des différents faciès de granites	19	Etudes pétrographiques	29
a) <i>Le granite gris</i>	19	L'altération dans les granites gneissiques	30
b) <i>Le granite brun</i>	19	Etude chimique	31
c) <i>La pegmatite</i>	20	IV. — Les micaschistes	31
Subdivisions du massif de Vigneux-Orvault	21	Généralités	31
a) <i>La partie est</i>	21	Etude pétrographique	31
b) <i>La partie centrale</i>	23	Etude chimique	33
c) <i>La partie ouest</i>	25	Conclusions	34
Conclusions générales sur le granite du massif de Vigneux-Orvault...	25	V. — Les accidents basiques de la série métamorphique	34
		Etude chimique	34
		CONCLUSIONS	35

Chapitre II. — ETUDE DE LA RADIOACTIVITE : LES METHODES

GÉNÉRALITÉS	39	1) L'activité dans les granites	44
<i>Echantillonnage</i>	41	<i>Discussion des résultats</i>	44
<i>Préparation des échantillons</i>	41	<i>Conclusions</i>	45
<i>Méthodes et mesures</i>	41	2) L'activité dans les granites gneissiques	47
ETUDE DES RAYONNEMENTS GAMMA AU COMPTEUR		<i>Conclusions</i>	47
G. M.	42	3) L'activité dans les roches métamorphiques	47
Méthode	42	<i>Discussions des résultats</i>	48
Résultats	42	<i>Conclusions</i>	48
		Conclusions générales	48

ETUDE DE LA-RADIOACTIVITÉ PAR LA MÉTHODE DES ÉMULSIONS NUCLÉAIRES	49	Erreurs de la méthode des plaques nucléaires	52
Généralités	49	a) <i>Erreur due à l'échantillonnage</i>	53
Détermination de la radioactivité globale ..	50	b) <i>Erreur due à l'hétérogénéité de la répartition des traces alpha</i>	54
Méthode	50	c) <i>Erreur due au comptage</i>	54
Etude des plaques nucléaires	51	d) <i>Erreur due aux calculs</i>	54
Calculs	51	Autoradiographie des lames minces	56
Distinction entre Th et U	52	<i>Technique</i>	56

Chapitre III. — LA RADIOACTIVITÉ DANS LES DIFFÉRENTES UNITES PETROGRAPHIQUES

I. — RADIOACTIVITÉ DU MASSIF GRANITIQUE DE VIGNEUX-ORVAULT	59	Minéralisation uranifère dans le gra- nite orienté	70
1. La partie est	59	Répartition de l'uranium	71
L'activité du granite des environs d'Orvault	59	III. — RADIOACTIVITÉ DES GRANITES GNEISSI- QUES	71
Radioactivité anormale du granite brun du Brulais	61	Minéraux radioactifs des granites gneissiques	72
Relation entre l'altération et la pré- sence d'autunite	63	a) <i>La pyrite</i>	72
Le rôle des oxydes de fer	63	b) <i>La monazite</i>	74
2. La partie centrale	65	c) <i>La biotite</i>	74
Minéralisation uranifère dans les car- rières du Maroc et de la Faverie	65	d) <i>L'apatite</i>	74
3. La partie ouest	67	e) <i>L'allanite</i>	74
II. — RADIOACTIVITÉ DE LA BANDE DE GRANITE DU NW DE NANTES	67	Conclusions	75
L'activité dans le granite gris ..	69	IV. — RADIOACTIVITÉS DES MICASCHISTES ET DES AMPHIBOLITES	75
La radioactivité au voisinage des mi- caschistes	69	V. — TENEUR EN U ET EN Th DANS QUELQUES MINÉRAUX ACCESSOIRES	77
		a) <i>Zircon</i>	78
		b) <i>Apatite</i>	78
		c) <i>Monazite</i>	79
		d) <i>Allanite</i>	79
		e) <i>Pyrite et oxydes de fer</i>	80

Chapitre IV. — GEOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LA RÉGION ÉTUDIÉE

I. — RÉPARTITION DES TENEURS EN URANIUM	81	Diagramme ternaire U — K — (K + Na) ..	87
Exposé et discussion de la méthode fluorimétrique	81	Relation entre rayonnement gamma et po- tassium	89
Préparation des solutions	81	Relation entre rayonnement gamma et ura- nium	91
a) <i>Attaque</i>	82	III. — RELATIONS ENTRE URANIUM ET DIVERS AUTRES MÉTAUX (Pb, Ca, Ba, Sr, V, Cr) ..	91
b) <i>Séparation</i>	82	La méthode spectrophotographique utilisée	92
c) <i>Extraction</i>	82	<i>Valeur des résultats</i>	92
Fluorimétrie proprement dite	82	Discussion des résultats	93
Erreurs de la méthode	83	<i>Plomb</i>	93
a) <i>Erreur due à l'échantillonnage</i> ..	83	<i>Calcium - Strontium - Baryum</i> ..	96
b) <i>Erreur due à l'attaque</i> ..	83	<i>Conclusions</i>	97
c) <i>Erreur due à la séparation</i> ..	85		
Discussion des résultats	85		
II. — RELATIONS ENTRE URANIUM ET MÉTAUX ALCALINS (K, Na)	87		
Méthode de dosage des alcalins	87		

Chapitre V. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A. — Conclusions pétrographiques ..	99	B. — Conclusions radiogéologiques ..	100
-------------------------------------	----	--------------------------------------	-----

ANNEXE : RESULTATS DES ANALYSES ..	103	BIBLIOGRAPHIE	109
------------------------------------	-----	---------------------	-----

ILLUSTRATIONS

FIG. 1. — Carte géologique de la Bretagne	16
2. A, B, C, D. — Relations entre $(K_2O + Na_2O)$, $(Fe_2O_3 + FeO)$, K_2O , Na_2O et SiO_2 dans les granites et les micaschistes	36
3. — Carte représentative de la répartition des points de prélèvements	40
4. — Carte représentative de la distribution de l'activité gamma	43
5. — Carte représentative de la distribution des teneurs en uranium (méthode des plaques nucléaires)	58
6. — Histogramme montrant la répartition des teneurs en uranium, déterminées par la méthode des plaques nucléaires, dans le granite de la partie est du massif de Vigneux	60
7. — Histogramme montrant la répartition des teneurs en uranium, déterminées par la méthode des plaques nucléaires, dans le granite du NW de Nantes	68
8. — Carte représentative de la distribution des teneurs en uranium (méthode fluorimétrique)	84
9. — Histogramme de la répartition des teneurs en uranium, déterminées par la méthode fluorimétrique, dans le granite de la partie est du massif de Vigneux	86
10. — Histogramme de la répartition des teneurs en uranium, déterminées par la méthode fluorimétrique, dans le granite du NW de Nantes	87
11. — Diagramme ternaire montrant les relations entre U, K et $(K + Na)$ dans les granites ...	88
12. — Diagramme ternaire montrant les relations entre U, K et $(K + Na)$ dans les micaschistes	89
13. — Relation entre l'activité gamma et la teneur en potassium	90
14. — Relation entre l'activité gamma et la teneur en uranium	91
15. — Relations entre les teneurs en uranium et en calcium, strontium, baryum, et entre les teneurs en strontium et potassium.	97
16. — Carte géologique de la région étudiée	<i>En face de</i> 100
Pl. I à XXIV	<i>Hors-texte</i>

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous étudions la radiogéologie d'une partie du département de la Loire-Atlantique, située au Nord de Nantes.

Dans le *premier chapitre*, nous entreprenons une étude pétrographique détaillée de la région. Après la description de chaque unité pétrographique, à savoir, le massif granitique de Vigneux-Orvault, la bande de granite du NW de Nantes, les granites gneissiques du NW de Nantes et les micaschistes du NE de Nantes, nous avons étudié particulièrement l'altération et son effet sur les différents faciès de roches.

Dans le *deuxième chapitre*, nous avons décrit les méthodes utilisées pour la mesure du rayonnement gamma et pour la mesure du rayonnement alpha. Cette dernière méthode est particulièrement décrite et discutée.

Le *troisième chapitre* est consacré à l'étude de la répartition de l'uranium dans chaque unité pétrographique par l'emploi de plaques photographiques dites « nucléaires ». Nous avons montré qu'il y a une relation étroite entre l'altération et la radioactivité des roches. Nous avons également remarqué l'importance des oxydes de fer dans la concentration de l'uranium quand cet uranium est d'origine secondaire.

Dans le *quatrième chapitre* est décrite la méthode fluorimétrique accompagnée d'une discussion sur les erreurs de cette méthode. Les résultats des analyses sont comparés avec ceux obtenus par la méthode de plaques nucléaires. Nous avons abordé ensuite quelques problèmes de géochimie de l'uranium et nous avons établi une relation entre l'uranium et les métaux alcalins (potassium et sodium), de même qu'entre l'uranium et les alcalino-terreux, cette dernière relation étant établie à partir d'analyses spectrophotiques.

SUMMARY

The writer studies the radiogeology of a region in the departement of "Loire-Atlantique", at the North of Nantes.

In the *first chapter*, the writer discussed the petrology of the region studied. After describing the different petrographic units, he studied particularly the phenomena of weathering and its influence on the different types of rocks.

The writer exposed, in the *second chapter*, the methods used for measuring the radioactivity of rocks using the Geiger Counter and the nuclear photographic emulsion plates. The second method is particularly described and discussed.

The *third chapter* contains the studies of the repartition of radioactive elements for each petrographic unit of the region. The writer pointed out the relationship between the weathering and the radioactivity of rocks. At the end of this chapter, he remarks the importance of the iron oxides in the concentration of uranium of secondary origin.

In the *fourth chapter*, the author exposed in details the fluorimetric method used for determining the uranium amounts in rocks. He compared the results obtained by this method with those obtained by the method of nuclear emulsion plates. The writer discussed some geochemical problems of uranium, with special reference to alkalies (K and Na) and to some other elements (Pb, Ca, Sr, Ba) determined by a spectrographic method.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit erforschen wir die Radiogeologie einer Partie des Departement der Loire-Atlantique, die nördlich von Nantes liegt.

Im *ersten Kapitel* beginnen wir mit einer präzisen petrographischen Übersicht der Region. Nach der Beschreibung von jeder petrographischen Einheit, studieren wir insbesondere die Alteration und ihr Ergebnis auf die Gesteine.

Im *zweiten Kapitel*, beschreiben wir die Methoden die wir für die Messung der Gamma- und Alpha Strahlen verwendet haben. Diese letzte Methode wird insbesondere beschrieben und diskutiert.

Im *dritten Kapitel* übersehen wir wie das Uranium in jeder petrographischen Einheit verteilt ist. Wir werden zwischen die Alteration und die Radioaktivität der Gesteine eine Relation hervorheben. Wir bemerken auch wieviel die Eisenoxyden in der Konzentrierung des Uraniums wichtig sind, wenn dieses Urainum eine sekundäre Herkunft hatt.

Im *letzten Kapitel* beschreiben wir eine chemische Methode für die Messung des Gehaltes der Gesteine in Uranium; diese Methode wird dann diskutiert. Die Resultate sind verglichen mit denen die mit der photographischen Methode erhalten wurden. Einige geochemische Problem sind in Betracht genommen: Relation zwischen Uranium und die Alkali, Relation zwischen Uranium und die Elemente der Calcium Familie; diese letzte Relation ist auf spectrographischen Methode festgesetzt.

AVANT-PROPOS

Au terme de ces trois années de travail, il m'est agréable de remercier ceux qui m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés que j'ai pu rencontrer en réalisant cet ouvrage.

C'est tout d'abord au Professeur M. Roubault, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière, que j'adresserai l'expression de ma gratitude. A mon arrivée en France, envoyé par le Commissariat à l'Energie Atomique d'Egypte, je me sentais bien dépaycé dans une nation dont je ne connaissais que fort peu la langue et les coutumes. M. le Professeur Roubault, tout de suite, sut me mettre à mon aise, m'intégrer à cette Ecole qu'il a fondée, m'introduire dans sa « maison ». Grâce à lui, me fut épargnée cette période d'adaptation si préjudiciable à un travail effectif. En outre, tout au long de mon travail, il n'a cessé de me faire bénéficier de sa profonde connaissance de tous les problèmes de la pétrographie. Je le remercie d'avoir bien voulu, malgré toutes les charges qu'il assume, s'occuper de moi comme il l'a fait.

La radiogéologie et la géochimie de l'uranium m'intéressant particulièrement, M. le Professeur R. Coppens, dont les travaux en ces matières font autorité, a bien voulu diriger mes recherches. C'est lui qui a choisi le sujet de mon travail ; il m'a attribué sans hésiter la partie la plus intéressante de cette Bretagne qu'il connaît si bien. Il a été pour moi le « maître » éclairé qui, d'un mot, d'un conseil, savait me faire sortir d'une impasse et donnait une orientation nouvelle à mes travaux. Son aide et sa sympathie me furent précieuses en toutes circonstances. Je lui adresse mes remerciements les plus chaleureux et mon hommage le plus sincère.

Au début de mon travail, je me suis heurté à de grosses difficultés d'ordre pétrographique. Je me suis alors tourné vers M. G. Sadran, Maître de Conférences à l'Université de Nancy, qui a accepté de m'aider avec une amabilité et une gentillesse qui m'ont profondément touché. Grâce à ses encouragements, j'ai persévéré dans une voie qui m'apparaissait quelquefois sans issue. Il a, en outre, bien voulu revoir tout le chapitre « Pétrographie », me faisant profiter de ses connaissances étendues et de sa grande expérience. Qu'il veuille bien trouver ici, avec mes remerciements, l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

M. J. Hilly, Maître de Conférences à l'Université de Nancy, m'a été d'un grand secours dans la préparation de mon manuscrit et dans l'impression de ma thèse. Il n'a pas hésité à me consacrer une part importante de son temps. Qu'il me soit permis de lui exprimer toute ma gratitude.

Avec MM. J. Fabriès, J. Touret, J.-M. Stussi, M. et Mme J. Maumené, MM. G. Jurain et J.-M. Hameurt, j'ai eu de très fréquentes discussions scientifiques dont j'ai souvent tiré le meilleur profit. Je les en remercie, ainsi que d'avoir accepté la tâche ingrate de vérifier la rédaction de mon manuscrit.

Je suis redevable aux Laboratoires de Chimie et de Spectrographie du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques de Nancy, respectivement placés sous la direction de MM. Behr et Govindaraju, de nombreuses analyses d'échantillons. Toute ma reconnaissance est acquise au Personnel et aux Directeurs de ces Laboratoires pour leur concours efficace.

Ma reconnaissance s'adresse également aux Membres du Centre de Recherches Radiogéologiques de Nancy, avec qui j'ai vécu tout au long de ces trois années et parmi lesquels je suis heureux de ne compter que des amis.

Dans l'élaboration matérielle de ce travail, j'ai largement bénéficié de l'aide efficace que le Personnel de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, sous la direction de M. P. Bristiel, Secrétaire Général, n'a pas hésité à m'apporter. Je pense tout particulièrement à M. Bauer qui a réalisé avec son talent habituel les planches photographiques de ce Mémoire ; à M. Lestreit qui s'est chargé de l'illustration graphique ; à M. Cuny, Chef du Service intérieur, qui m'a aidé dans la correction des épreuves. A tous, je tiens à exprimer ici ma sincère gratitude.

Enfin, je ne saurais oublier, dans ces remerciements, le Commissariat à l'Energie Atomique d'Egypte, qui m'a permis d'effectuer ce travail dans les conditions matérielles les meilleures.

Nancy, le 15 Juin 1959.

INTRODUCTION

La radiogéologie est une science toute jeune, mais qui se développe très rapidement. Le terme semble avoir été créé par Vernadsky vers 1933. Cet auteur se proposait, dès l'origine, d'étudier tous les effets et conséquences de la radioactivité des matériaux de l'écorce terrestre, aussi bien pour rechercher les gisements immédiatement utilisables, que pour étudier les phénomènes géologiques auxquels ces minéraux sont liés.

Depuis cette époque, le but n'a pas changé et la radiogéologie, bien qu'ayant un aspect extérieur la rapprochant des sciences physiques, n'en est pas moins étroitement liée à la géologie.

En 1956, nous nous sommes proposé d'étudier les aspects radiogéologiques d'une région granitique. A cette époque, la Bretagne et la Vendée avaient déjà été prospectées systématiquement par les équipes du Commissariat à l'Energie Atomique qui y auraient trouvé de nombreux indices. Il nous a donc paru judicieux de choisir un secteur d'une de ces régions. Il s'agit d'une partie du département de la Loire-Atlantique s'étendant au Nord, au NE et au NW de Nantes sur une superficie d'environ 250 km².

Les études de terrain et de laboratoire se sont poursuivies depuis avril 1956 jusqu'en 1959. Elles ont été rendues difficiles par une couverture végétale continue, masquant souvent les affleurements. Il nous a été parfois impossible de prélever un seul échantillon sur une surface de quelques kilomètres carrés.

En outre, l'altération superficielle des roches est importante. Les granites sont fortement arénisés, et bien des échantillons qui paraissent sains à l'œil nu montrent au microscope une altération généralisée des principaux minéraux. Ce phénomène présente une grosse importance, surtout du point de vue géochimique, car il est certain que le dépôt des minéraux uranifères secondaires dépend dans une large mesure du parcours des eaux d'infiltration. Pour avoir des résultats valables, nous avons dû procéder à une étude complète de chaque affleurement, étudiant et comparant chaque fois un grand nombre d'échantillons et mesurant l'activité gamma à l'aide d'un compteur Geiger.

Au total, nous avons ramené dans les laboratoires du Centre de Recherches Radiogéologiques de Nancy environ 600 échantillons répartis sur 79 affleurements.

Une étude radiogéologique ne peut se concevoir que lorsque la pétrographie est connue. Les grands traits en avaient déjà été tracés par quelques chercheurs. Mais nous avons dû examiner environ 200 plaques minces au microscope polarisant. Ces plaques, devant être ensuite étudiées du point de vue radiogéologique, n'étaient pas couvertes, ce qui en a quelque peu gêné l'étude détaillée.

Nous avons mesuré le rayonnement alpha de chacun des 600 échantillons porphyrisés, par la méthode des plaques photographiques dites nucléaires.

Nous nous sommes ensuite attachés à déterminer la répartition des éléments radioactifs dans les roches par l'autoradiographie des lames minces.

Il nous a été également nécessaire d'avoir une idée des compositions chimiques des différents types de roches. Trente et une analyses chimiques complètes ont été effectuées dans les laboratoires du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques de l'Université de Nancy, sous la direction de M. Behr, ingénieur-chimiste.

En outre, nous avons dosé personnellement les alcalins, potassium et sodium, dans 200 échantillons environ. Nous avons cherché à déterminer le rapport $K_2O/(K_2O + Na_2O)$ et sa relation avec la teneur en uranium, ainsi qu'avec les autres éléments analysés.

Enfin, pour étudier le rapport entre l'uranium et quelques éléments intéressants (Ca, Sr, Ba, V, Cr, Pb), nous avons analysé spectrographiquement environ 100 échantillons par une méthode graphique spéciale.

Nous avons d'abord cherché à préciser la pétrographie de la région étudiée en définissant un certain nombre de types de roches. Pour chacun d'eux, nous avons porté spécialement notre attention sur leur altération qui présente une importance primordiale pour la géochimie des éléments uranifères.

C'est la géochimie de l'uranium qui a ensuite constitué notre principal sujet de recherches. Pour cela, nous avons fait, dans la région proposée, une étude complète de la radioactivité et nous avons cherché quelle relation pouvait exister entre cette radioactivité et la présence d'éléments bien déterminés.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

INTRODUCTION

HISTORIQUE

Dès les premiers temps de la géologie, la Bretagne a intéressé les chercheurs et les plus grands auteurs n'ont pas cessé de se pencher sur les problèmes qu'elle pose. C'est d'abord Charles Barrois (1851-1939) qui précise les grands traits de la Bretagne méridionale. Un ensemble de schistes cristallins paléozoïques, recoupés par des batholites granitiques, forment un synclinorium passant à un anticlinal dans la partie méridionale (Anticlinal de Cornouaille). Même si ses conclusions ont dû être remaniées en fonction de l'évolution générale de la pétrographie, ses observations n'en gardent pas moins une valeur descriptive en tout point remarquable. Ch. Barrois avait tracé une direction de travail qui a été empruntée par de nombreux auteurs. Il serait trop long de les citer tous ici. Nous parlerons simplement des travaux essentiels concernant directement la région qui nous intéresse.

A. Lacroix (1889) a étudié les gneiss à pyroxène du Morbihan et de la Loire Inférieure. Ces formations, assez peu habituelles, avaient de quoi intéresser ce grand spécialiste de la pétrographie descriptive, et les déterminations d'espèces qu'il y a faites restent des modèles.

Un autre minéralogiste a beaucoup travaillé dans cette région, récoltant tout au long de ses courses une remarquable collection de minéraux qui se trouve aujourd'hui au Muséum d'Histoire Naturelle de Nantes. Il s'agit de C. Baret (1898) qui a contribué de façon tout à fait exceptionnelle à la connaissance des minéraux de la région.

Les travaux suivants ont déjà un caractère plus modernes, mais ne concernent, en général, que des secteurs bien déterminés : Y. Brière (1920) a étudié les élogites de la Loire Inférieure, tandis que L. Bureau et G. Ferronière (1910) levaient la carte géologique de Nantes.

A partir de cette époque et jusqu'à une date relativement récente, il y a peu de travaux importants à signaler. La réputation des maîtres qui ont travaillé dans la région

est telle qu'il semble que tous les problèmes soient presque complètement résolus et que peu de chercheurs osent s'y attaquer à nouveau.

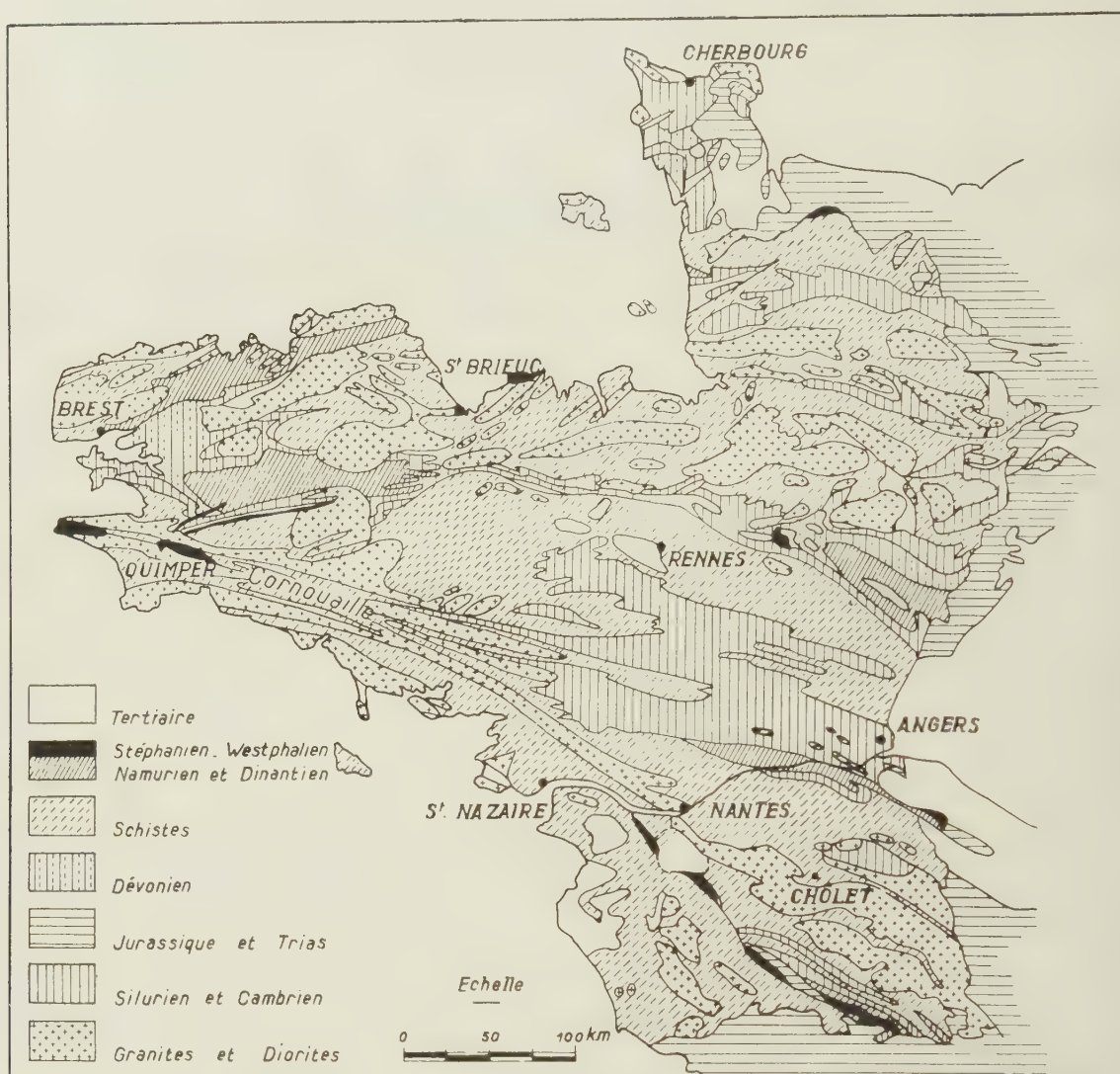


FIG. 1. — Carte géologique de la Bretagne.

PLANCHE I

FIG. 1. — Partie orientale de la Carrière du Maroc, Vigneux (Granite).

FIG. 2. — Veinules de quartz enfumé apparaissant en sombre sur le fond granitique (*Carrière du Maroc, Vigneux*).

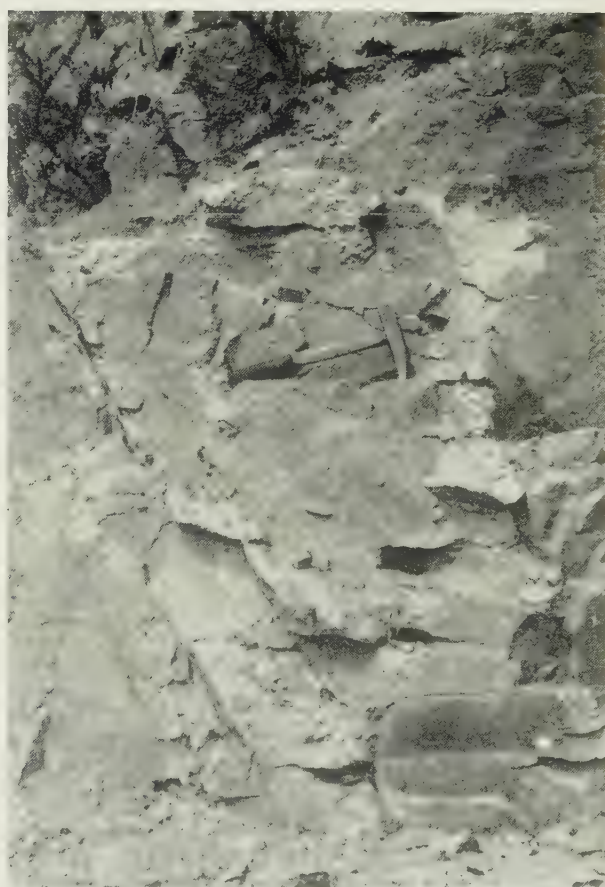
FIG. 3. — Filons de pegmatite dans le granite (*Carrière de la Faverie, Vigneux*).



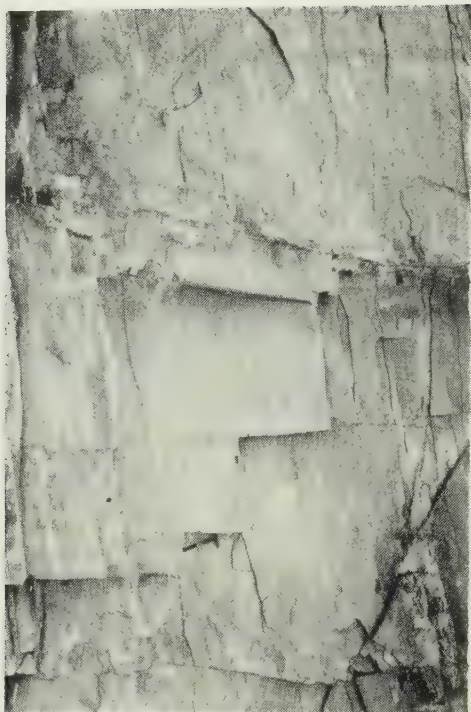
1



2



3



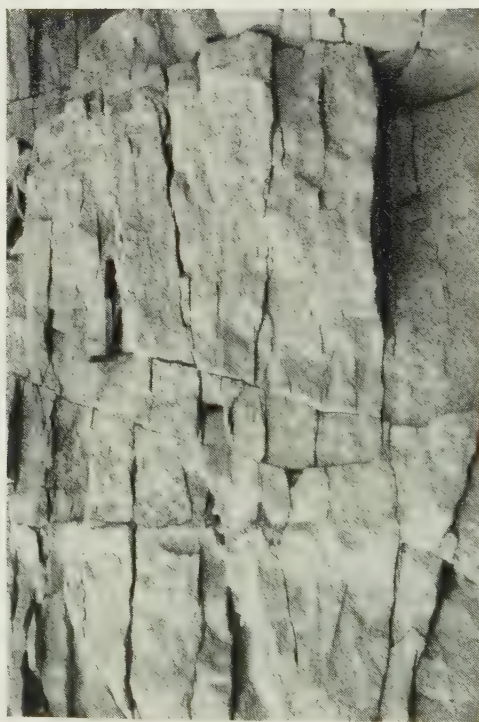
2



4



1



3

Il faut attendre J. Cogné (1957) qui, après la seconde guerre mondiale, reprend le problème avec des idées neuves. Il a étudié les schistes cristallins et les granites de la Bretagne méridionale à la lumière des concepts modernes de la géologie.

DESCRIPTION GEOGRAPHIQUE

La région étudiée (fig. 16) fait partie du département de la Loire-Atlantique et est située au N, NE et NW de Nantes. Elle comprend les agglomérations d'Orvault, Sautron, Treillières, Vigneux, Le Temple, Saint-Etienne de Montluc et Couëron.

Limitée à l'Est par l'Erdre, au S et SW par la Loire, elle est recoupée au N par une ligne qui va de Treillières jusqu'au sud de Savenay en passant par Le Temple. Sa surface est d'environ 150 km².

Elle comporte la partie sud du « Sillon de Bretagne » entre Nantes et Savenay et contient l'anticlinal de Vigneux, l'anticlinal de Chatenay-sur-Loire et une partie de l'anticlinal de Cornouaille.

LES GRANDES UNITES DE LA REGION

La région que nous nous sommes proposé d'étudier peut être divisée en cinq unités :

1) *Le massif de Vigneux-Orvault.* — Ce massif de granite occupe la partie centrale de la région. Il se développe en une ellipse allongée dans la direction WE à l'intérieur des micaschistes. Sa surface est d'environ 60 km². Au voisinage de ce massif, à Orvault, un gisement pegmatitique de forme elliptique n'en est séparé que par quelques centaines de mètres de micaschistes.

2) *La bande de granite du NW de Nantes.* — Cette bande fait partie de la bande granitique de la Pointe du Raz - Nantes. Elle est allongée en direction WNW - ESE. A l'Est, elle est entourée par des micaschistes. Au Nord, sur quelques kilomètres, elle est en contact avec le massif de Vigneux-Orvault, et à l'Ouest avec des granites gneissiques.

3) *Les granites gneissiques.* — A l'W-NW de Nantes, et entre la bande granitique du NW de Nantes et la Loire, on rencontre une série de roches de différents faciès que nous appellerons granites gneissiques. Ces roches contiennent quelques minéralisations intéressantes.

4) *Les micaschistes.* — Au N et au NE de Nantes se trouve une série des micaschistes traversée par des filons de quartz enfumé et quelquefois par des filons pegmatitiques ou aplitiques.

PLANCHE II

FIG. 1. — Blocs de granite altéré (*Carrière de la Primaudière, Orvault*).

FIG. 2. — Réseau de diaclases orthogonales dans le granite (*Carrière du Maroc, Vigneux*).

FIG. 3. — Granite brun (*Carrière du Malescot, Vigneux*).

FIG. 4. — Cassure dans le granite avec remplissages d'argiles (*Carrière du Maroc, Vigneux*).

5) *Les accidents basiques de la série métamorphique.* — Dans la région étudiée, deux petites bandes d'une variété d'amphibolite à pyroxène longent la bordure ouest du granite de la bande Pointe du Raz - Nantes.

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES UNITÉS

I. — LE MASSIF DE VIGNEUX-ORVAULT

GENERALITES

Le massif granitique de Vigneux-Orvault a la forme d'une ellipse allongée en direction WE. Occupant la partie centrale de la région étudiée, ce massif est en contact avec des micaschistes sauf à l'Ouest où il passe à la bande granitique de la Pointe du Raz - Nantes. A Orvault, une lentille pegmatitique appartenant au massif de Vigneux-Orvault est séparée de l'ensemble du massif par quelques centaines de mètres de micaschistes.

En général, le granite du massif de Vigneux présente des diaclases presque orthogonales (Pl. II, fig. 2) orientées NW-SE et quelquefois des petites failles de direction et rejets variables.

Comparaison de ce massif avec d'autres massifs de la région. - Aperçu tectonique.

J. Cogné (1957) a montré que le granite du massif de Vigneux est analogue à celui de Grandchamp-Allaire (au Nord-Est de Vannes). Il a donné les relations entre le massif de Vigneux et la bande Pointe du Raz - Nantes.

« ...Jusqu'ici tous les massifs granitiques observés au flanc septentrional des bandes syntectoniques étaient rattachés par une sorte de pédoncule à ces bandes et le passage de l'un à l'autre se faisait de façon progressive. Ainsi ces massifs paraissaient-ils s'échapper en quelque sorte des zones en voie de tectonisation pour s'étaler vers des régions orogéniquement plus calmes, d'où leurs caractères fréquemment atectoniques.

Or, ici ce « pédoncule » manque, et le massif de Vigneux est en contact avec la bande « Pointe du Raz - Nantes » par une zone tectonisée, laminée, liée évidemment à l'épisode orogénique responsable du laminage qui affecte la bande principale. On a aussi l'impression que la bande Pointe du Raz - Nantes recoupe la partie occidentale du massif de Vigneux, alors qu'elle en est en principe la zone d'enracinement. De fait, on observe vers le NE, dans la région de Savenay, des faciès grossiers inclus dans la bande syntectonique, faciès identiques à ceux du massif de Vigneux, dont c'est là probablement la véritable zone d'enracinement décalée vers le NE de plus de 3 000 mètres.

Ceci permet d'apprécier dans cette région le sens et la nature du mouvement responsable du développement de la « zone broyée sud-armoricaine ». Comme dans les secteurs plus occidentaux, il s'agit d'un mouvement de friction longitudinale. Les séries ont été décalées davantage par déplacement horizontal des blocs que par déplacement vertical, contrairement à l'impression que donne dans cette région « le Sillon de Bretagne », dont la formation est en fait beaucoup plus récente, et se surimpose à cette tectonique fondamentale... ».

Les différents types de granites.

La plus grande partie du massif de Vigneux est caractérisée par un granite à deux micas et à gros grains quelquefois porphyroïde. Cependant les variétés à grain fin ne sont pas rares. Le batholite est traversé par de nombreux filons pegmatitiques (Pl. I, fig. 3), de 0,25 mètre à 1 mètre de puissance, surtout aux environs de Vigneux et Orvault. Il est également recoupé par des petits filons de gneiss granitiques et de micaschistes, surtout dans sa partie ouest près du contact avec les micaschistes.

On peut distinguer dans ce granite du massif de Vigneux-Orvault deux variétés que nous appellerons : le granite gris et le granite brun. Le granite gris est un granite à deux micas à grain fin ou à grain moyen, généralement sain ou légèrement altéré. Dans la plupart des cas, il est plus ou moins orienté et la roche semble avoir subi des efforts tectoniques. Le granite brun (Pl. II, fig. 3) est un granite à deux micas, riche en biotite, à gros grain fréquemment altéré. Il contient, en quantité variable, des oxydes de fer qui lui confèrent sa couleur brune. On le trouve surtout aux environs de Vigneux. Nous ne pouvons pas faire de carte détaillée représentant l'extension de ces deux faciès, car ils sont très souvent associés à l'échelle de l'affleurement.

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS FACIES DE GRANITES

a) Le granite gris.

— ECHANTILLON N° 235 H. CARRIÈRE « LE MARROC », AFFLEUREMENT N° 48 E 9.

Il s'agit d'un granite à deux micas et à grain moyen. L'étude microscopique a montré l'existence des minéraux suivants :

Minéraux cardinaux. — Le quartz : les cristaux assez petits, parfois craquelés, assemblés en mosaïque, montrent une extinction roulante. Les craquelures sont remplies par des oxydes de fer bruns et opaques. Il entoure les grands cristaux automorphes de plagioclases.

Les plagioclases : les cristaux, de taille assez grande, sont en général automorphes et fréquemment corrodés. Leur cœur est souvent légèrement zoné ; il est habituel de voir le cœur plus fortement altéré en séricite que la périphérie. Ils contiennent environ 35 % d'anorthite.

Le microcline : les plages sont plus petites que celles des plagioclases, et les surfaces de contact entre les deux minéraux sont très corrodées. Des veinules de quartz se développent dans les isthmes de corrosion, donnant une structure myrmecitique. Le microcline est abondant. Les cristaux de grande taille, très peu altérés, montrent fréquemment des textures perthitiques.

Minéraux caractéristiques. — Le granite est caractérisé par la présence du mica, biotite et muscovite, ce dernier paraissait légèrement plus abondant. Tous deux se groupent en petits agrégats de taille assez réduite. Cette allure particulière du mica semble due aux efforts tectoniques qu'a subis la roche. La biotite contient des zircons avec halos pléochroïques.

Minéraux accessoires. — A titre accessoire, ce granite contient du zircon et un peu d'apatite. Le zircon s'y rencontre surtout dans la biotite et montre toujours de très beaux halos pléochroïques.

b) Le granite brun.

— ECHANTILLON N° 302 H. CARRIÈRE « LE BRULIS », AFFLEUREMENT N° 55 D 13.

Il s'agit d'un granite à gros grain, à deux micas où domine la biotite, fortement altérée. L'étude de la plaque mince a montré l'existence des constituants suivants :

Minéraux cardinaux. — Le quartz : il paraît en grands cristaux, à extinction roulante, très craquelés. Les craquelures sont remplies par des oxydes de fer.

Les plagioclases : de grands cristaux, zonés et altérés en séricite surtout au centre sont abondants. Le microcline est plus fréquent et généralement moins altéré que les plagioclases. Il montre quelquefois des textures perthitiques.

Minéraux caractéristiques. — Les micas sont très abondants. La biotite, très riche en halos pléochroïques, est altérée en chlorite avec libération d'oxydes de fer ; cette altération se marque plus fortement sur la bordure des cristaux qu'au centre. La muscovite est altérée en damourite. Quelquefois, les micas se groupent en petits agrégats entre les cristaux de feldspaths.

Minéraux accessoires. — Ce sont des zircons et quelquefois de l'apatite. Le zircon est très abondant, le plus souvent en petits cristaux, quelquefois en grands cristaux dans la biotite. Ces cristaux sont entourés de halos pléochroïques.

c) La pegmatite.

Dans les environs de Vigneux, ainsi qu'à Orvault, le massif granitique est caractérisé par la présence des filons pegmatitiques dont nous avons parlé précédemment. En général, cette pegmatite est remarquable par la présence de grands cristaux de tourmaline, surtout dans la région d'Orvault.

— ECHANTILLON N° 26 H. CARRIÈRE « LA GRÉE » (ORVAULT), AFFLEUREMENT N° 33 F 12.

Au microscope, nous avons déterminé la présence des minéraux suivants :

Minéraux cardinaux. — Le quartz se présente en grands cristaux, plus ou moins craquelés. Le microcline est abondant. Les cristaux de grande taille, très peu altérés, montrent fréquemment des textures perthitiques.

Minéraux caractéristiques. — La biotite a disparu. La muscovite se développe en de nombreuses plages de grande taille parfois altérées en damourite.

Minéraux accessoires. — Un minéral accessoire prend une importance fondamentale : c'est la tourmaline qui caractérise cette pegmatite. Les grands cristaux, très abondants, sont de couleur bleue et fréquemment craquelés (Pl. IV, fig. 3). En général, ils sont entourés par des petits cristaux de quartz à extinction roulante. Cette tourmaline contient parfois de petites taches de couleur plus foncée.

Cette coloration se marque également le long des craquelures ; on distingue au centre de ces taches de minuscules cristaux d'un minéral trop petit pour être déterminé.

Un autre minéral est intéressant et accompagne la tourmaline. Il s'agit de l'almandin (Pl. IV, fig. 4), en deux variétés, l'une rose et l'autre incolore. La variété incolore contient des craquelures rouges qui semblent être dues à la présence d'oxydes de fer.

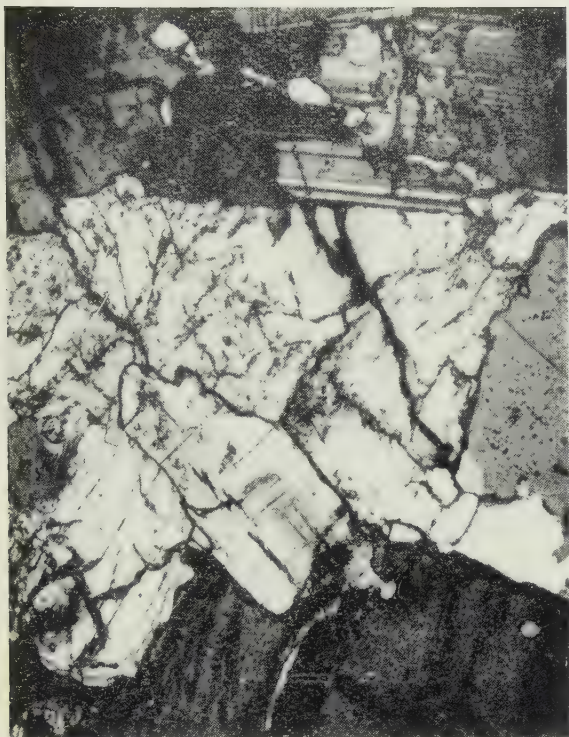
Il nous faut enfin signaler la présence de quelques petits cristaux d'apatite.

PLANCHE III

FIG. 1. — Granite à gros grain peu altéré. *Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 2. — Granite riche en biotite. Les zircons avec les halos pléochroïques sont abondants dans le mica. *Microphotographie L. P. × 40.*

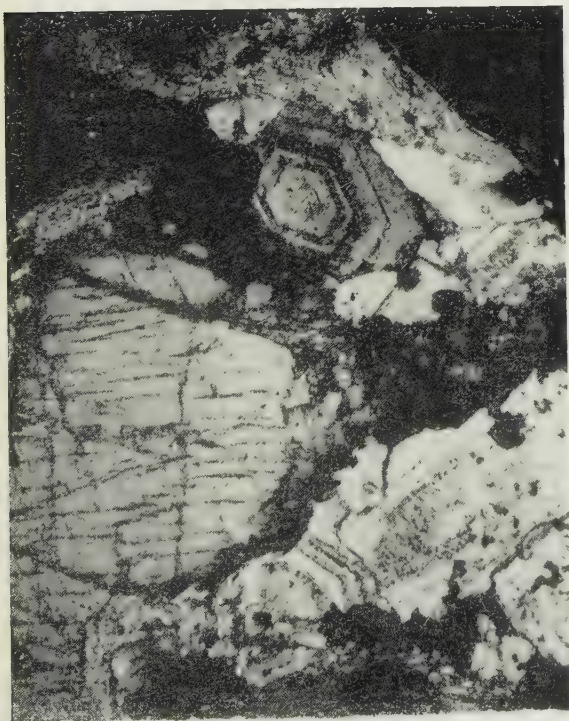
FIG. 3 et 4. — Plagioclases zonés dans le granite. *Microphotographie L. P. × 40.*



1



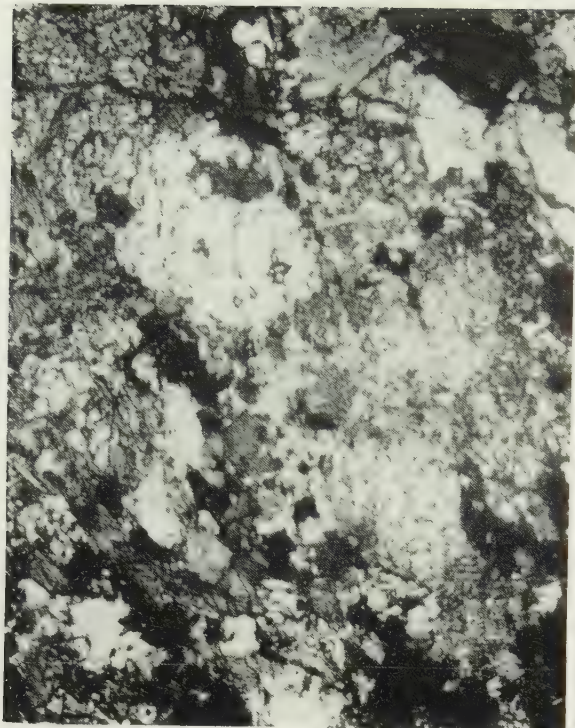
2



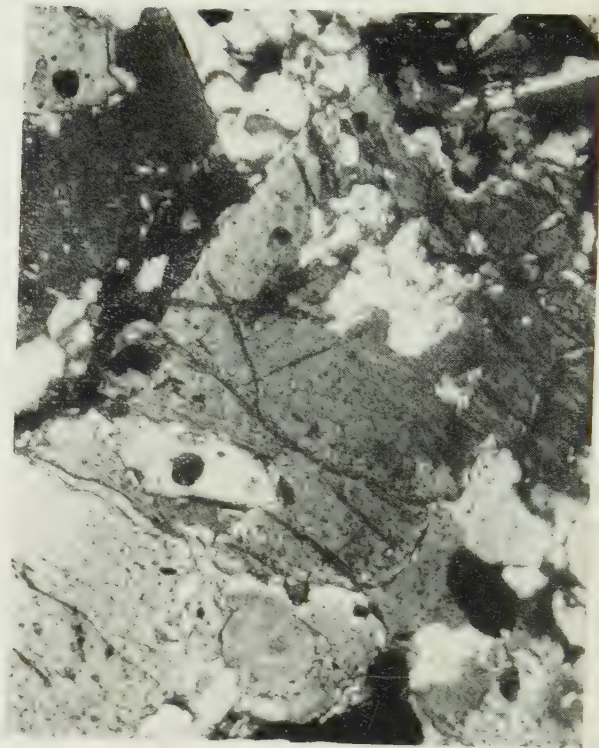
3



4



1



2



3



4

SUBDIVISIONS DU MASSIF DE VIGNEUX-ORVAULT

Le massif granitique de Vigneux-Orvault peut être subdivisé en trois parties :

a) *La partie est.* — Entre Treillières et Orvault, la région est caractérisée par la présence de la pegmatite à tourmaline et du granite brun qui parfois contient également de la tourmaline.

b) *La partie centrale.* — Vers le centre du massif, aux environs de Vigneux, le granite brun à gros grain est abondant. Il s'altère fortement en libérant des oxydes de fer de couleur brune.

c) *La partie ouest.* — Aux environs de « Le Temple », cette partie est directement en contact avec la bande Pointe du Raz - Nantes. Le granite de cet endroit est plus ou moins orienté et généralement pauvre en biotite.

a) **La partie est.**

— GÉNÉRALITÉS.

En plus de l'extrémité est du massif de Vigneux-Orvault, on peut rattacher à cette partie la lentille pegmatitique des environs d'Orvault. L'unité pétrographique de ce complexe est indiquée par la présence de tourmaline bleue, que l'on retrouve de façon constante aussi bien dans la pegmatite que dans le granite.

C. Baret (1878, 1898) a signalé la présence d'autunite dans cette pegmatite (Carrière « la Grée » à Orvault). Des échantillons contenant des petites paillettes d'autunite sont exposés au Musée d'Histoire Naturelle à Nantes. Nous avons longuement cherché à retrouver cette autunite sur le terrain, mais nous nous n'avons pas pu la mettre en évidence. A notre avis, l'autunite était présente sous forme de petites paillettes dispersées dans la pegmatite, et il nous a été impossible de la déceler. D'autre part, on ne peut accéder à toute la carrière, car elle est maintenant presque totalement noyée.

Cependant, lorsque nous avons étudié le gîte de pegmatite des « Perrières » (affleurement n° 34 F 12) à quelques kilomètres au nord d'Orvault, nous avons mis en évidence la présence de quelques petites paillettes d'autunite fixées aux cristaux de microcline. Nous avons remarqué une minéralisation analogue dans le granite brun qui se trouve près du Verdet (affleurement n° 44 E 11). Ultérieurement, nous reparlerons plus en détail de cette minéralisation.

A Orvault (affleurement n° 33 F 12) et aux Perrières, on peut observer le contact entre la pegmatite à tourmaline et le granite gris. Le passage est quelquefois marqué par une zone intermédiaire de quelques mètres de granite brun. Nous avons étudié cette zone

PLANCHE IV

FIG. 1. — Granite à grain fin altéré. *Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 2. — Grand cristal de tourmaline avec inclusions de quartz. *Microphotographie L. P. × 60.*

FIG. 3. — Tourmaline zonée dans la pegmatite d'Orvault. *Microphotographie L. N. × 40.*

FIG. 4. — Association de tourmaline (t) et d'almandin (a) dans le granite des Epinettes. *Microphotographie L. P. × 40.*

aux Epinettes (affleurement n° 36 F 11) et nous avons constaté que l'almandin, qui est associé à la tourmaline dans la pegmatite, se poursuit dans le granite brun, mais pas dans le granite gris. Au N et NE d'Orvault, le granite brun à gros grain contient un peu de tourmaline (Les Champs Gats, affleurement n° 35 F 12 et La Guichardière, affleurement n° 43 E 13). Par contre, elle manque à la Bussonnière (affleurement n° 32 F 13). A La Primaudière (affleurement n° 59 D 11), nous avons rencontré une variété de granite rose à deux micas.

Dans l'est de la région, à « Le Brulis » (affleurement n° 55 D 13), le granite est plus fortement orienté que dans le reste de la partie est du massif de Vigneux, et il montre différents faciès. Le granite gris est associé à du granite brun porphyroïde, riche en biotite, parfois en tourmaline. Ils sont recoupés, dans cet affleurement, par quelques petits filons de micaschiste et de gneiss granitiques. Les filonnets de gneiss granitique contiennent quelquefois des aiguilles de rutile et de petits cristaux d'andalousite. Ceci doit être en relation avec la proximité du contact du massif de Vigneux et des micaschistes. Dans le reste de la partie est du massif de Vigneux-Orvault, le granite est, en général, brun et garde un faciès constant.

— ANALYSES CHIMIQUES.

Les analyses chimiques de quelques granites et de pegmatite de cette partie est du massif de Vigneux ont donné les résultats consignés dans le tableau I.

TABLEAU I

	n° 152	n° 145	n° 138	n° 139	n° 146	n° 149	n° 131	n° 164	n° 141
SiO ₂	67,06	67,99	68,56	71,94	72,22	73,45	69,47	69,71	70,71
Al ₂ O ₃	16,73	18,36	16,08	17,75	16,44	13,83	15,98	17,41	15,07
Fe ₂ O ₃	1,56	—	0,70	0,33	0,33	0,78	0,17	0,78	0,54
Fe O	1,36	0,35	2,22	0,57	0,35	1,71	0,78	1,14	1,07
Mn O	0,76	traces	0,03	—	traces	traces	0,02	0,05	—
Mg O	1,46	0,02	0,51	0,12	0,17	0,35	0,28	0,55	0,40
Ca O	0,30	0,23	0,66	0,16	0,41	0,76	0,53	0,90	0,40
Na ₂ O	2,41	4,38	3,55	2,95	3,48	2,68	4,02	3,58	2,61
K ₂ O	3,24	6,60	3,60	4,44	4,20	4,14	5,82	3,90	5,28
TiO ₂	0,08	0,02	0,36	0,04	0,12	0,30	0,09	0,19	0,18
P ₂ O ₅	1,28	0,41	0,23	0,18	0,34	0,31	0,45	0,21	0,28
PF	1,42	0,80	1,15	1,72	1,47	1,86	1,01	1,78	2,22
Total	97,66	99,16	97,65	100,20	98,53	100,17	98,60	99,93	98,46

Paramètres C. I. P. W.-Lacroix.

Analyse n° 152 : I (II). 3. 1. 3.

» n° 145 : I'. 4 (5). 1. 3.

» n° 138 : I'. (3) 4. 1'. 3 (4).

» n° 139 : I. 3'. 1. 3.

Analyse n° 146 : I. (3) 4. 1. 3.

» n° 149 : I'. 3'. 1'. 3.

» n° 131 : I. 4. 1. 3.

» n° 164 : I'. 3 (4). 1 (2). 3 (4).

» n° 141 : I'. 3 (4). 1. 3.

Analyse n° 152	Echantillon n° 26 H :	Pegmatite à tourmaline, Orvault.
» n° 145	» n° 27 H :	Granite gris, Orvault.
» n° 138	» n° 29 H :	Granite brun, Les Epinettes.
» n° 139	» n° 34 H :	Granite gris, La Bouvardière.
» n° 146	» n° 39 H :	Granite brun, La Primaudière.
» n° 149	» n° 295 H :	Granite brun, Le Brulis.
» n° 131	» n° 300 H :	Granite gris, Le Brulis.
» n° 164	» n° 350 H :	Granite à tourmaline, Les Perrières.
» n° 141	» n° 372 H :	Granite brun, La Bussonnière.

Après les analyses chimiques, nous pouvons conclure que la pegmatite est plus riche en éléments alcalins que le granite. Il existe peu de différence de composition entre le granite gris et le granite brun. La seule variation se remarque dans les teneurs en oxydes de fer qui sont peut-être légèrement plus élevées dans le granite brun que dans le granite gris à cause de l'abondance de minéraux ferromagnésiens et de leur altération.

b) La partie centrale.

— GÉNÉRALITÉS.

La patrie centrale du massif de Vigneux-Orvault est caractérisée par le granite des environs de Vigneux. C'est un granite gris, quelquefois brun, plus ou moins altéré, de grain variable. Il est traversé par de nombreux filons pegmatitiques de 0,25 mètre à 1 mètre de puissance.

Dans la Carrière du Maroc (affleurement n° 48 E 9), nous avons rencontré, en plus des granites gris et brun, quelques zones verticales d'environ 25 cm d'épaisseur de granite broyé et plus ou moins orienté. Dans ces zones, le granite est blanc, friable et riche en chlorite, ce qui indique une altération poussée. Dans cette même carrière, nous avons rencontré deux cassures secondaires d'environ 40 cm de puissance contenant un remplissage argileux. Cette argile (Pl. II, fig. 4) provient de l'altération du granite. On y trouve également quelques veinules de quartz enfumé d'environ 5 cm d'épaisseur et de 20 cm de longueur (Pl. I, fig. 2). Le granite gris qui contient ces filons de quartz enfumé est, en général, plus sain et moins altéré que l'ensemble du granite de la carrière. Nous avons signalé (Coppens et Hussein, 1957) la présence d'une minéralisation uranifère dans les deux carrières du Maroc et de la Faverie. Il s'agit vraisemblablement d'une variété d'autunite qui forme, dans les fissures des roches, des placages assez importants, mais difficilement repérables à l'œil nu. La teneur en uranium est voisine de 50 %. Nous reparlerons plus loin de cette minéralisation.

— ETUDE PÉTROGRAPHIQUE.

Les granites gris et bruns sont ici comparables à ceux que nous avons décrits auparavant. Mais, dans la partie centrale de ce massif, nous avons rencontré, en outre, quelques autres variétés de granite. Nous donnons ici quelques descriptions de plaques minces taillées dans certains de ces échantillons.

— ÉCHANTILLON N° 241 H. CARRIÈRE « LE MARROC », AFFLEUREMENT N° 48 E 9.

L'étude microscopique a montré la présence des minéraux suivants :

Minéraux cardinaux. — Le quartz qui paraît en cristaux de taille moyenne, à extinction roulante. Parfois, il se présente en petits cristaux arrangés en lits donnant au granite une texture gneissique.

Les plagioclases sont abondants, altérés en séricite (Pl. V, fig. 1 et 2), parfois zonés. Leur composition les place dans les termes albite-oligoclase.

Le microcline est plus abondant que les plagioclases, mais moins altéré. Il donne avec l'albite des structures perthitiques.

Les micas : la biotite et la muscovite sont également bien représentées. Elles sont orientées et arrangées en lits parallèles. L'altération de ces minéraux est très poussée, surtout en ce qui concerne la biotite qui est presque complètement chloritisée avec exsolution de lamelles d'oxydes de fer parallèlement aux clivages (Pl. V, fig. 3). La muscovite est altérée en damourite.

Minéraux accessoires. — Nous signalerons de petits cristaux de zircon et un peu d'apatite. Le zircon se trouve surtout dans les halos pléochroïques de la biotite altérée.

— ECHANTILLON N° 156 H. CARRIÈRE LA FAVERIE, AFFLEUREMENT N° 46 E 9.

Le granite est prophyroïde et à deux micas. Au microscope, nous voyons nettement une texture gneissique. Le quartz présente deux aspects bien distincts : tantôt de grands cristaux en mosaïque, tantôt de petits cristaux orientés et arrangés en lits plus ou moins parallèles.

Les plagioclases : les cristaux sont de taille assez grande, légèrement altérés en séricite. Il s'agit d'albite-oligoclase qui montre fréquemment de belles textures myrmékites.

Le microcline : très abondant, il s'associe avec l'albite pour donner une texture perthitique. Il est également légèrement altéré.

Les micas : comme dans l'échantillon précédent, la biotite et la muscovite sont broyées et disposées en lits parallèles donnant au granite une structure gneissique. Mais elles sont ici beaucoup plus altérées, la biotite en chlorite et la muscovite en damourite (Pl. V, fig. 4).

— ECHANTILLON N° 290 H. VIGNEUX, AFFLEUREMENT N° 67 C 8.

Il s'agit d'un granite brun à gros grain et à tourmaline. Dans cet échantillon, le quartz, feldspaths et micas sont tout à fait comparables à ceux des échantillons que nous avons étudiés ci-dessus. L'altération est très poussée et marquée par une quantité importante d'oxydes de fer se rassemblant dans les fissures et parfois dans les plans de clivages des cristaux.

En outre, nous y avons trouvé des petits cristaux de tourmaline bleue, qui est tout à fait comparable à la tourmaline de la pegmatite et du granite d'Orvault. La seule différence est que la tourmaline est ici légèrement altérée en produisant des produits ferrugineux (Pl. IV, fig. 2).

— ANALYSES CHIMIQUES.

Les analyses chimiques du granite de cette partie centrale du massif de Vigneux ont fourni les résultats cités dans le tableau II.

TABLEAU II

	n° 148	n° 134	n° 172	n° 162
Si O ₂	72,29	71,26	74,77	72,99
Al ₂ O ₃	15,83	13,52	15,67	15,57
Fe ₂ O ₃	0,17	0,21	0,17	0,18
Fe O	0,86	1,43	0,50	1,14
Mn O	traces	0,01	traces	0,01
Mg O	0,22	0,36	0,10	0,24
Ca O	0,64	0,24	0,51	0,53
Na ₂ O	3,69	3,35	3,62	2,95
K ₂ O	4,32	5,16	3,96	4,45
Ti O ₂	0,10	0,19	0,08	0,15
P ₂ O ₅	0,27	0,26	0,25	0,30
PF	0,86	0,83	1,32	1,46
<i>Total</i>	99,25	96,82	100,95	99,97

Paramètres C. I. P. W.-Lacroix : I. 3 (4). 1. 3'. I'. 24. 1. 3. I. 3 (4). 1. 3'. I. 3'. 1. 3.

Analyse n° 148	Echantillon n° 245 :	Granite gris, Le Maroc.
» n° 134	» n° 157 :	Granite gris, La Faverie.
» n° 172	» n° 270 :	Granite brun, La Roche.
» n° 162	» n° 290 :	Pegmatite, Vigneux.

Les résultats des analyses chimiques montrent une bonne homogénéité des granites de la partie centrale du massif de Vigneux.

c) **La partie ouest.**

Dans sa partie ouest, le massif de Vigneux est en contact avec la bande Pointe du Raz - Nantes. Au fur et à mesure que l'on se rapproche du contact, le granite devient de plus en plus laminé et orienté. Il est, en général, tout à fait comparable à celui de l'ensemble du massif. Nous avons trouvé à la Plaisance (affleurement n° 68 C 6) un granite rose à grain fin, riche en micas, surtout en muscovite, et fortement altéré.

— ANALYSES CHIMIQUES.

Les analyses chimiques des deux granites de cette région ont donné les résultats consignés dans le tableau III.

TABLEAU III

	n° 150	n° 142		n° 150	n° 142
SiO ₂	72,33	59,75	Na ₂ O	3,82	4,95
Al ₂ O ₃	14,26	22,76	K ₂ O	4,44	6,96
Fe ₂ O ₃	0,49	0,25	TiO ₂	0,07	0,09
FeO	0,50	0,43	P ₂ O ₅	0,19	0,46
MnO	traces	traces	PF	1,92	1,91
MgO	0,08	0,22			
CaO	0,48	0,24	Total	98,58	97,93

Paramètres C. I. P. W.-Lacroix : Analyse n° 150 : I. (3) 4. 1. 3'.

» n° 142 : I. 5. 1. 3.

Analyse n° 150 : Echantillon n° 396 : Granite orienté, Biliais Deniaud.

» n° 142 : » n° 450 : Granite rose orienté, La Plaisance.

Nous remarquons une différence entre le granite orienté de La Biliais Deniaud et le granite rose de la Plaisance. Ce dernier est plus riche en Al₂O₃ et K₂O qui semble provenir d'une proportion plus élevée de micas, mais qui entraîne des paramètres chimico-minéralogiques d'une roche saturée : syénite. Il ne semble pourtant pas qu'il y ait lieu de séparer cette roche de l'ensemble granitique caractérisant cette région.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES SUR LE GRANITE DU MASSIF DE VIGNEUX

La partie est du massif est caractérisée par la présence de filons de pegmatite à tourmaline qui recoupent le granite. A l'extrémité est, près du contact avec les mica-schistes, le granite contient quelques filons de mica-schistes et de gneiss granitiques. Aux environs de Vigneux, les faciès sont différents et la tourmaline est moins abondante. A l'Ouest, le granite est de plus en plus orienté et riche en muscovite.

II. — LA BANDE GRANITIQUE DU NW DE NANTES

GENERALITES

La bande granitique de la Pointe du Raz - Nantes s'étend sur plus de 250 km et sectionne sur toute cette distance la partie septentrionale du Domaine de l'anticlinal de Cornouaille (J. Cogné, 1957). Elle est bordée à l'Est par des micaschistes qui sont eux-mêmes limités vers le Nord par les formations paléozoïques constituant la partie méridionale des synclinaux de Teillé et d'Ancenis (région nord de Nantes).

En ce qui nous concerne, nous avons limité nos études à la partie sud de cette bande. Cette partie s'étend sur environ 25 km au NW de Nantes (depuis quelques kilomètres au Sud de Savenay jusqu'à Nantes). Elle limite les granites gneissiques de l'anticlinal de Cornouaille que J. Cogné a appelé « Migmatites » et qui, sur la carte géologique de Nantes, sont indiqués comme étant des gneiss granulitiques. La bande étudiée recoupe le flanc nord de cet anticlinal de migmatites à l'W - NW de Nantes.

Tectonique.

D'après les observations tectoniques de J. Cogné (1957) s'alignent tout au long de cette bande granitique des faciès mylonitiques plus ou moins importants. Ils correspondent à l'accident orogénique qui est observé à l'Ouest de cette bande et qui se marque par un laminage longitudinal provoquant de nombreuses fractures striées sub-horizontalement et dirigées WNW - ESE. Le long de cet alignement tectonique, entre Pont-Château et la Loire, apparaît un accident morphologique remarquable : c'est le « Sillon de Bretagne » étudié autrefois par le Général Jourdy (1909) et par C. Barrois (1930). Il s'agit d'une ligne de collines pratiquement rectiligne qui domine de 50 à 80 mètres tout le pays affaissé de la Basse Loire et la Grande Brière.

Ch. Barrois a montré que cet accident qui amenait ainsi les granites à surplomber le pays cristallophyllien de la Basse Loire était dû à des failles longitudinales anciennes, tracées dès la fin des temps carbonifères, mais qui ont rejoué après le Miocène.

Le granite à deux micas.

Le granite à deux micas de la bande Pointe du Raz - Nantes est appelé granulite par les anciens auteurs et indiqué comme tel sur la carte. C'est une roche leucocrate, généralement à grain fin et montrant différents faciès. L'aspect varie d'un affleurement à l'autre, mais quelques caractères spéciaux restent assez constants et permettent de le différencier du granite du massif de Vigneux : richesse en muscovite, orientation des micas et finesse de grain.

ETUDE PETROGRAPHIQUE

Le faciès le plus typique de ce granite se trouve à La Contrie à l'Ouest de Nantes (affleurement n° 2 I 13). Il s'agit d'un granite à deux micas, très homogène et peu altéré. Nous donnerons une description rapide d'une des plaques minces de ce faciès.

— ECHANTILLON 18 H. LA CONTRIE, AFFLEUREMENT N° 2 I 13.

Il s'agit d'un granite à deux micas peu altéré.

Le quartz se présente en grands cristaux arrangés en mosaïque.

Les plagioclases sont abondants et altérés en séricite. Quelquefois, ils montrent des aspects myrmékittiques.

Le microcline est moins abondant que les plagioclases et moins altéré.

Les termes micacés sont représentés par de la biotite et de la muscovite. Toutes deux sont légèrement orientées et écrasées. L'altération n'en est pas très remarquable. Quelquefois, la biotite et la muscovite sont altérées en chlorite et en damourite particulièrement sur les bords des cristaux.

A titre accessoire, nous remarquons le zircon et un peu d'apatite. Le zircon est entouré par des halos pléochroïques dans la biotite.

Ce faciès de granite à deux micas se poursuit sur environ 8 km à l'W de Nantes ; il est exploité à La Rivaudière (affleurement n° 4 I 11) et Bas Village (affleurement n° 10 H 12). En suivant la bande de granite de la Pointe du Raz - Nantes, apparaissent des faciès plus orientés, écrasés et altérés. Dans la région de Saint-Etienne-de-Montluc, l'orientation des micas est très nette, tandis que le quartz et les feldspaths conservent leur texture régulière. Nous donnerons un exemple de ce granite orienté qui est exploité à la carrière des Bois des Bonnes Dames en Saint-Etienne-de-Montluc (affleurement n° 40 F 7).

— ECHANTILLON N° 425 H.

Le quartz se présente en cristaux de taille assez petite, écrasé, orienté et arrangé en lits parallèles.

Les plagioclases sont abondants. Les cristaux sont grands, zonés et altérés en séricite.

Le microcline est assez abondant, associé à l'albite, il montre une texture perthitique. Il est altéré et contient, ainsi que les plagioclases, des oxydes de fer dans des craquelures provoquées par l'écrasement de la roche.

Les micas : ce sont de la biotite et de la muscovite, orientées et arrangées en lits parallèles. La biotite est presque totalement remplacée par de la chlorite et la muscovite par de la séricite.

Les minéraux accessoires sont des zircons qui se trouvent dans les plages altérées de la biotite.

Enfin, à l'extrémité nord de la partie de la bande Pointe du Raz - Nantes que nous avons étudiée, apparaît un faciès de granite orienté très altéré et riche en oxydes de fer.

MINERALISATIONS

Il semble que les conditions aient été favorables à une certaine minéralisation uranifère. En effet, le Commissariat à l'Energie Atomique a mis en évidence des minéralisations très intéressantes à la Charpenteraie (affleurement n° 72 C 4), à la Touche (affleurement n° 77 B 3) et à la Babinais (affleurement n° 76 B 3). Nous signalons, d'autre part, la présence d'une minéralisation uranifère, très probablement une variété d'autunite, à côté de Saint-Etienne-de-Montluc (Carrière des Bois des Bonnes Dames, affleurement n° 40 F 7). Cette autunite se trouve en placages sur les feldspaths. Nous reparlerons plus loin en détail de cette minéralisation.

ETUDE CHIMIQUE

L'analyse chimique de quelques granites de la partie sud de la bande Pointe du Raz-Nantes a donnée les résultats suivants (Tableau IV).

TABLEAU IV

	n° 159	n° 140	n° 137	n° 166	n° 173	n° 174
SiO ₂	72,55	69,24	69,31	69,50	70,18	72,24
Al ₂ O ₃	16,86	16,48	15,68	15,98	18,79	14,04
Fe ₂ O ₃	0,70	0,42	0,45	0,35	0,26	0,47
FeO	1,07	1,07	1,29	1,43	1,57	2,42
MnO	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01
MgO	0,51	0,74	0,51	0,50	0,27	0,28
CaO	0,23	0,15	0,62	0,31	0,19	0,32
Na ₂ O	2,75	3,42	3,55	3,15	2,08	1,67
K ₂ O	4,75	4,62	3,96	4,75	5,52	5,40
TiO ₂	0,24	0,23	0,19	0,16	0,13	0,27
P ₂ O ₅	0,24	0,25	0,28	0,28	0,15	0,27
PF	1,32	1,62	1,47	0,66	1,81	1,70
<i>Total</i>	101,23	98,22	97,34	97,10	100,96	98,89

Paramètres C. I. P. W.-Lacroix { I. 3'. 1. 3. I'. 1'. 1. 3'. I. 3'. 1. 2' (3.
I. (3) 4. 1. 3. I'. (3) 4. 1. (3) 4. I'. 3'. 1. 2'.

Analyse n° 159 : Echantillon n° 48 H : Granite à deux micas, Fosse-Neuf.
 » n° 140 : » n° 72 H : Granite à deux micas, Bas-Village.
 » n° 137 : » n° 12 H : Granite à deux micas, Rivaudière.
 » n° 166 : » n° 425 H : Granite légèrement orienté, Saint-Etienne-de-Montluc.
 » n° 173 : » n° 470 H : Granite orienté, La Petite Haie.
 » n° 174 : » n° 510 H : Granite légèrement orienté, Saint-Savin.

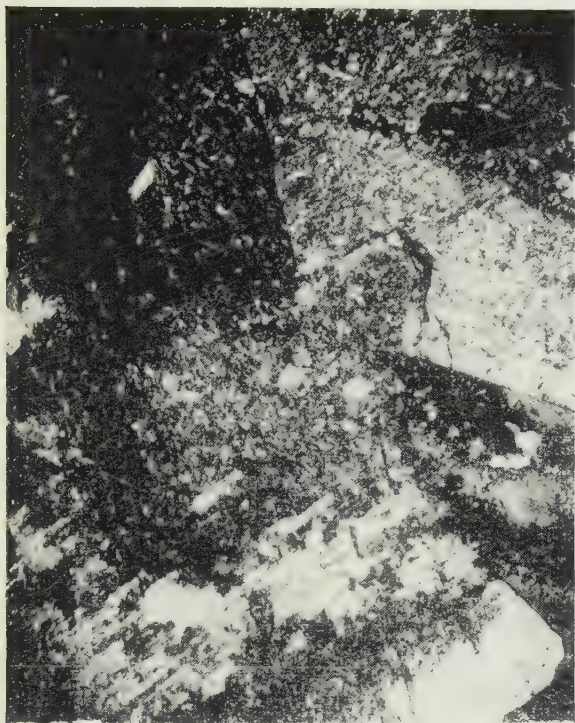
Le granite de la bande Pointe du Raz - Nantes a une composition chimique plus ou moins homogène. Les analyses 173 et 174 montrent une légère différence du paramètre S par rapport à celui des autres granites ; ceci est dû à une teneur élevée en K₂O et moins élevée en Na₂O, mais ne correspond à aucune différence fondamentale dans la composition minéralogique telle qu'on peut la déduire de l'observation microscopique.

PLANCHE V

PHENOMENES D'ALTERATION DANS LE GRANITE

FIG. 1 et 2. — Séricitisation. *Microphotographie L. P.* × 40.

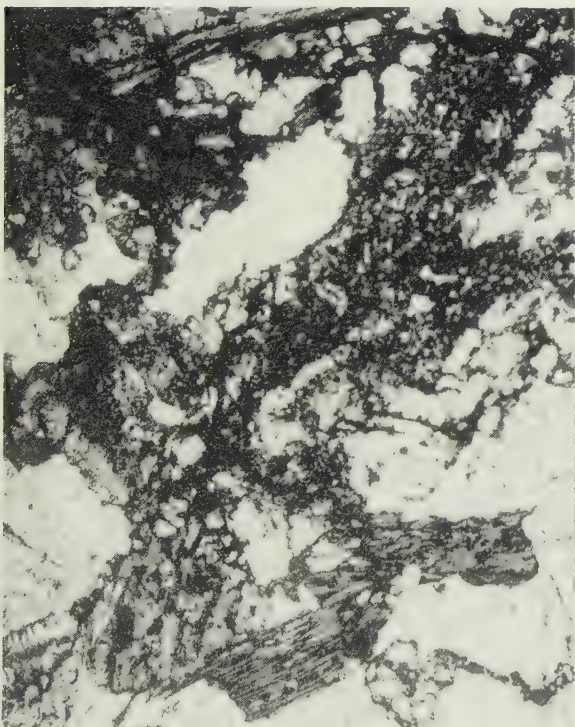
FIG. 3 et 4. — Chloritisation des micas et remplissages d'oxydes de fer dans les fissures. *Microphotographies L. N.* × 40.



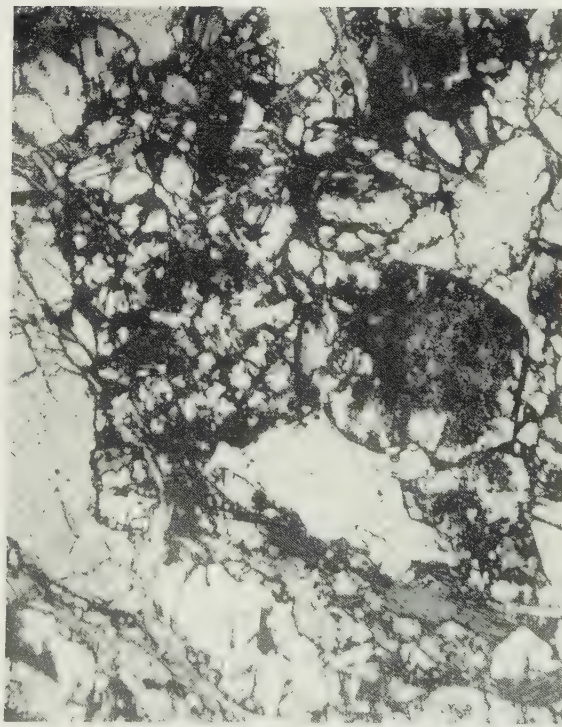
1



2



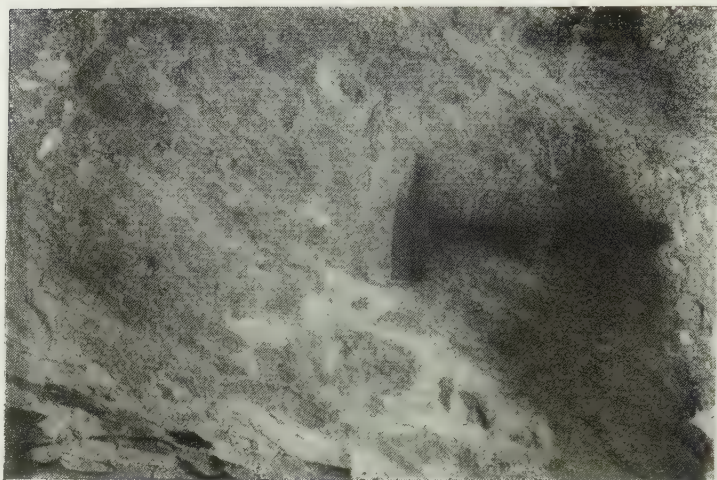
3



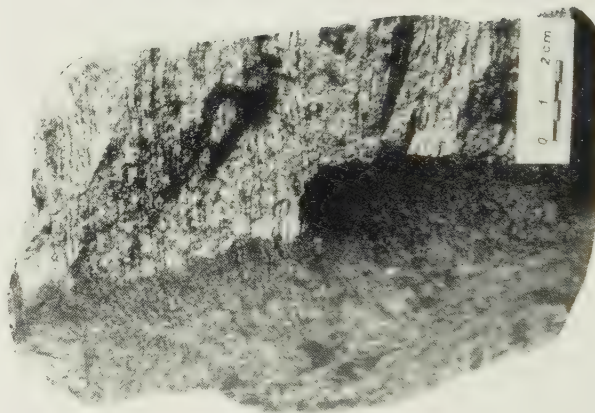
4



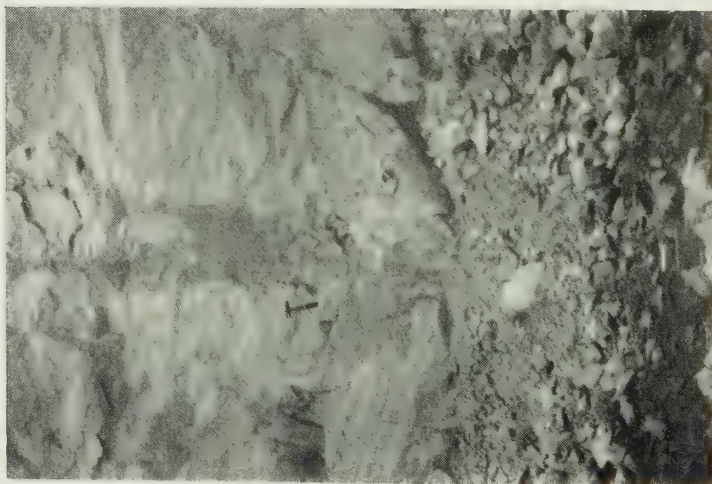
1



4



3



2

III. — LES GRANITES GNEISSIQUES

GENERALITES

A l'W-NW de Nantes, une série de granites gneissiques se situe entre la bande granitique de la Pointe du Raz - Nantes et la Loire. Sur la carte géologique à 1/80 000^e de Nantes, ces roches sont considérées comme gneiss et gneiss leptyniques. J. Cogné les a appelées « Migmatites ». La texture, la composition chimique et l'étude pétrologique nous ont permis de les appeler « granites gneissiques ». Ils montrent différents faciès et contiennent quelquefois des enclaves de micaschistes ou de granite orienté.

Ce sont des roches à grain moyen, quelquefois porphyroïdes et à feldspaths roses, plus ou moins altérés. Les micas sont abondants et altérés. Ces roches ont subi des forces tectoniques qui ont donné plusieurs directions de fissures. La couleur est généralement grise, mais les roches peuvent quelquefois devenir blanches et friables à cause de la kaolinisation des feldspaths.

MINERALISATIONS

Il semble que ces granites gneissiques aient été favorables à la formation de plusieurs minéralisations. Nous y rencontrons souvent de la pyrite qui forme des placages, surtout dans les fissures où elle se présente habituellement en cubes. Quelquefois, ce minéral existe dans la roche même, mais est alors moins bien cristallisée et forme de petites veinules entre les cristaux de la roche. La pyrite est souvent associée à de la fluorine violette qui donne à la roche une teinte gris violacé (Pl. VI, fig. 4). La fluorine est, en général, bien cristallisée surtout dans les fissures de la roche.

D'autre part, dans la carrière de la Gatine en Saint-Herblain (Pl. VI, fig. 1), nous avons trouvé quelques petits cristaux d'un minéral de thorium. Il s'agit très probablement d'une variété de thorianite. Nous avons également déterminé la présence de petits cristaux d'allanite, radioactive dans les granites gneissiques de la carrière des Daudières à Couëron. La monazite est dans ces roches également assez fréquente. Nous reparlerons plus loin de ces minéralisations (Chap. III).

ETUDE PETROGRAPHIQUE

Nous donnerons quelques exemples des plaques minces étudiées dans les granites gneissiques.

PLANCHE VI

FIG. 1. — Carrière inondée de la Gatine, *Saint-Herblain* (Granite gneissique).

FIG. 2. — Remplissages d'oxydes de fer (en sombre) dans les fissures de granite gneissique.

FIG. 3. — Echantillon de granite gneissique.

FIG. 4. — Placages de fluorine violette sur le granite gneissique (*Carrière de la Gatine, St Herblain*).

— ECHANTILLON N° 125 H. CARRIÈRE « LA POMPIÈRE », AFFLEUREMENT N° 1 J 12.

Il s'agit d'un granite gneissique gris à grain fin et à pyrite.

Minéraux cardinaux. — Le quartz paraît en petits cristaux disposés en lits parallèles. Les cristaux de plagioclases sont de petite taille et peu fréquents. Le microcline est abondant ; il se présente en cristaux d'une grande taille. Il est associé à l'albite pour donner des textures perthitiques. Les feldspaths alcalins sont altérés.

Les micas sont représentés par de la biotite et de la muscovite arrangées en lits parallèles. Toutes deux sont presque complètement altérées en chlorite et en damourite.

Les minéraux accessoires sont la pyrite et la monazite. De petits cubes de pyrite sont assez fréquents (Pl. VII, fig. 1). La monazite, qui est assez abondante, se trouve en petits cristaux généralement entourés par des produits bruns d'altération.

— ECHANTILLON N° 98 H. CARRIÈRE « LA GATINE », AFFLEUREMENT N° 5 I 11.

Ce granite gneissique est riche en petits cristaux de quartz qui sont craquelés et arrangés en lits parallèles. Le microcline est perthitique, plus ou moins altéré et associé à quelques petits cristaux de plagioclases.

Les micas sont disposés en lits de direction parallèles, et très altérés (Pl. VII, fig. 3). La biotite est complètement chloritisée, tandis que la muscovite est légèrement damouritisée.

Les minéraux accessoires sont de la pyrite, la fluorine violette accompagnées d'un peu de monazite. La pyrite se présente en cubes, alors que la fluorine se forme en placages sur les cristaux du microcline. On rencontre peu fréquemment de petits cristaux de monazite. La roche contient des oxydes de fer dûs à l'altération et qui remplissent les craquelures des cristaux, et les interstices entre les minéraux (Pl. VII, fig. 2).

— ECHANTILLON N° 110 H. CARRIÈRE « LA GATINE ».

Il s'agit d'un granite gneissique à pyrite. Cette plaque mince diffère des précédentes par la présence des grands cristaux de microcline pouvant atteindre jusqu'à deux centimètres de longueur (Pl. VIII, fig. 4). Il est perthitique et peu altéré. La pyrite se trouve dans les craquelures entre les cristaux de la roche (Pl. VIII, fig. 3).

— ECHANTILLON N° 114 H. CARRIÈRE « LA GATINE ».

L'étude microscopique a montré une association de pyrite et de fluorine violette dans ce granite gneissique à feldspaths roses. C'est dans cet échantillon que nous avons trouvé un minéral brun verdâtre, et allongé en cristaux d'environ 2 mm de longueur. L'étude autoradiographique de cette lame mince a montré qu'il s'agit d'un minéral de thorium. La teneur en thorium est de l'ordre de 55 %. C'est très probablement de la thorianite.

— ECHANTILLON N° 182 H. CARRIÈRE « DES DAUDIÈRES », AFFLEUREMENT N° 16 H 8.

Ce granite gneissique ressemble à celui de l'échantillon n° 125 H décrit précédemment, il n'en diffère que par l'absence de pyrite. En plus, à titre accessoire, l'allanite se présente en petits cristaux bruns, allongés, mais assez rares.

L'ALTERATION DANS LES GRANITES GNEISSIQUES

Les granites gneissiques sont plus ou moins altérés. Ils contiennent des quantités variables d'oxydes de fer qui donnent à la roche des couleurs différentes. Ces oxydes de fer sont surtout concentrés dans les fissures. La biotite est souvent complètement remplacée par de la chlorite. Les feldspaths sont altérés. Ils peuvent être dans certains cas complètement kaolinisés. Enfin, les cristaux de monazite sont souvent entourés d'une bande brune de produits d'altération.

ETUDE CHIMIQUE

Les résultats de l'analyse chimique de deux échantillons de granite gneissique sont rassemblés dans le tableau V.

TABLEAU V

	n° 190	n° 168		n° 190	n° 168
SiO ₂	72,86	69,16	K ₂ O	4,98	5,40
Al ₂ O ₃	13,84	14,76	TiO ₂	0,09	0,64
Fe ₂ O ₃	0,17	1,90	P ₂ O ₅	traces	0,76
FeO	1,22	1,14	F	0,79	—
MnO	traces	0,02	S	0,02	0,05
MgO	0,15	0,31	PF	0,62	1,82
CaO	0,42	0,60			
Na ₂ O	3,48	2,75	Total	98,64	99,31

Paramètres C. I. P. W.-Lacroix : Analyse n° 190 : I. 4. 1. 3.
 » n° 168 : I'. (3) 4. 1. 3.

Analyse n° 190 : Echantillon n° 98 H : Granite gneissique à fluorine et à pyrite, La Gatine.
 » n° 168 : » n° 125 H : Granite gneissique à pyrite, La Pompière.

Les résultats des analyses montrent une grande ressemblance entre les granites gneissiques et les granites de la région.

IV. — LES MICASCHISTES

GENERALITES

Recoupés à l'E et au SE par la Loire, à l'W par la bande granitique Pointe du Raz - Nantes, les micaschistes s'étendent au N et NE de Nantes et constituent une surface d'environ 50 km².

L'ensemble a une structure isoclinale de direction EW avec un pendage de 30 à 60° vers le N. Par contre, au NE de la région, la direction des couches devient SE. Quelquefois, les micaschistes sont traversés par des filons de quartz enfumé (Pl. IX, fig. 2) ou par des filons pegmatitiques ou aplitiques. Ils sont, en général, gris ou bruns, altérés de façon inégale et contiennent des quantités variables d'oxydes de fer. La série de micaschistes du N et du NE de Nantes contiennent des minéraux intéressants déjà signalés par C. Baret (1898) ; grossulaire, idocrase, andalousite et staurotide. Malheureusement la plupart des carrières ont disparu et il nous a été difficile de trouver ces affleurements (Pl. IX, fig. 1). Nous avons cependant pu retrouver la plupart des minéraux signalés.

ETUDE PETROGRAPHIQUE

L'étude microscopique de ces micaschistes nous a permis de reconnaître l'abondance de la tourmaline et la présence d'autres minéraux intéressants. Nous donnerons quelques exemples d'étude de plaques minces de ces micaschistes.

— ECHANTILLON N° 5 H. CARRIÈRE DU TAILLIS (PRÈS DE SAUTRON).

C'est un micaschiste à tourmaline.

La muscovite et la biotite se trouvent en belles lamelles sub-parallèles, séparées par quelques amandes de quartz et un peu d'orthose. La muscovite est plus fréquente que la biotite. Toutes deux sont plus ou moins altérées. La biotite contient quelques petits cristaux de zircon avec halos pléochroïques.

Le quartz est en grain fin, craquelé et contient des oxydes de fer dans les craquelures.

La tourmaline brune est en cristaux bien formés d'assez petite taille. Quelquefois, les cristaux contiennent au centre de petites inclusions de quartz.

Nous avons aussi trouvé quelques petits cristaux de disthène incolore, minéral qui n'avait pas été signalé par C. Baret.

Dans cette même carrière, Carrière du Taillis, la tourmaline est très abondante. La taille des cristaux est variable et peut atteindre 1 cm de longueur et 2 mm de diamètre (Pl. IX, fig. 3). Elle montre les mêmes caractères que dans la pegmatite d'Orvault : certaines zones sont plus foncées que le reste du cristal ; au centre se trouve un minéral très petit et difficile à déterminer. Il s'agit très probablement de zircon.

— ECHANTILLON N° 133 H. LA CORNICHE, AFFLEUREMENT N° 22 G 13.

Il s'agit d'un micaschiste à tourmaline et à disthène (Pl. X, fig. 1). L'étude microscopique nous permet d'observer les minéraux suivants : la muscovite est moins fréquente que la biotite. Toutes deux sont très altérées. Les lamelles de micas sont séparées par du quartz et quelques petits grains d'orthose. Le quartz se présente en cristaux craquelés d'assez petite taille. Les craquelures sont remplies par des oxydes de fer. La tourmaline est très fréquente et se trouve en cristaux de grande taille. En général, elle est brune et zonée. La couleur des bordures des cristaux est en général brune ; par contre, au centre la coloration devient bleue. Elle contient de la magnétite et parfois des petits cristaux de quartz corrodé. Le disthène se trouve en petits cristaux incolores, maelés et arrondis. Il contient des oxydes de fer autour des cristaux et quelquefois dans les plans de clivage.

C'est dans les micaschistes de l'affleurement n° 21 G 13 (Belle-Vue - Pont du Cens), que nous avons rencontré, en plus de la tourmaline et du disthène, quelques cristaux de staurotide. Ce minéral est craquelé et corrodé (Pl. X, fig. 4).

L'étude microscopique des micaschistes du Pont du Cens nous a montré qu'ils sont très riches en biotite et plus ou moins en tourmaline.

Les halos pléochroïques dans la biotite sont très fréquents. La tourmaline est brune et quelquefois accompagnée de grands cristaux d'almandin (Pl. X, fig. 2). Cette association est sans doute en relation avec la proximité des gisements de pegmatite d'Orvault.

C'est aussi au Pont du Cens, dans les micaschistes à tourmaline, que nous avons rencontré quelques petites géodes de quartz enfumé à pyrite et à pennine (Pl. X, fig. 3). La pyrite se trouve dans les fissures et n'est pas cristallisée. Les cristaux de tourmaline

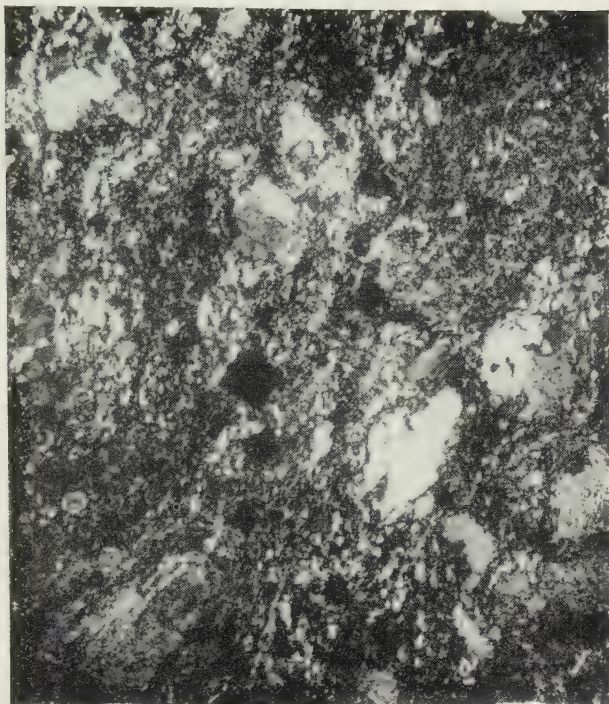
PLANCHE VII

FIG. 1. — Cubes de pyrite dans le granite gneissique. *Microphotographie L. P.* $\times 40$.

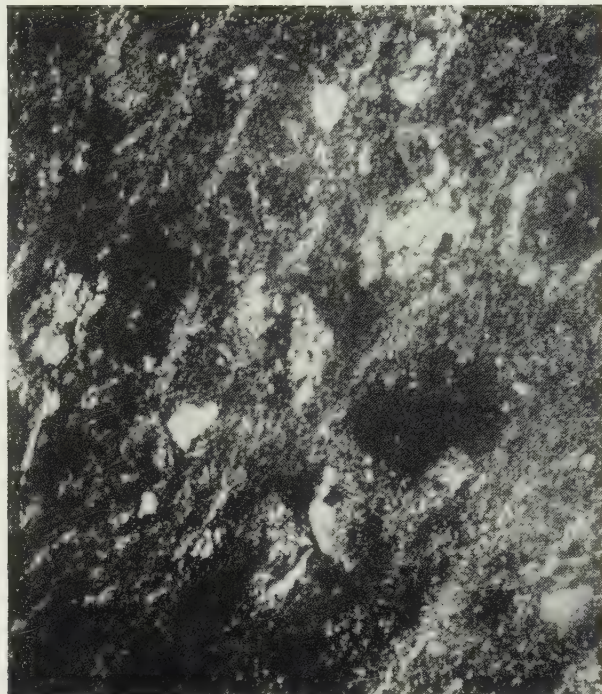
FIG. 2. — Remplissages d'oxydes de fer d'altération dans les fissures de granite gneissique. *Microphotographie L. P.* $\times 40$.

FIG. 3. — Chloritisation de la biotite dans le granite gneissique. *Microphotographie L. N.* $\times 40$.

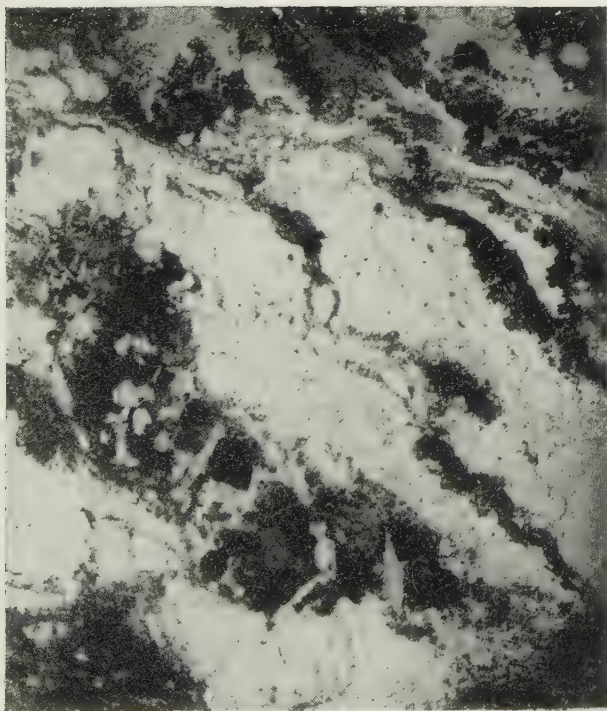
FIG. 4. — Granite gneissique avec prophyroblastes de feldspaths perthitiques. *Microphotographie L. P.* $\times 40$.



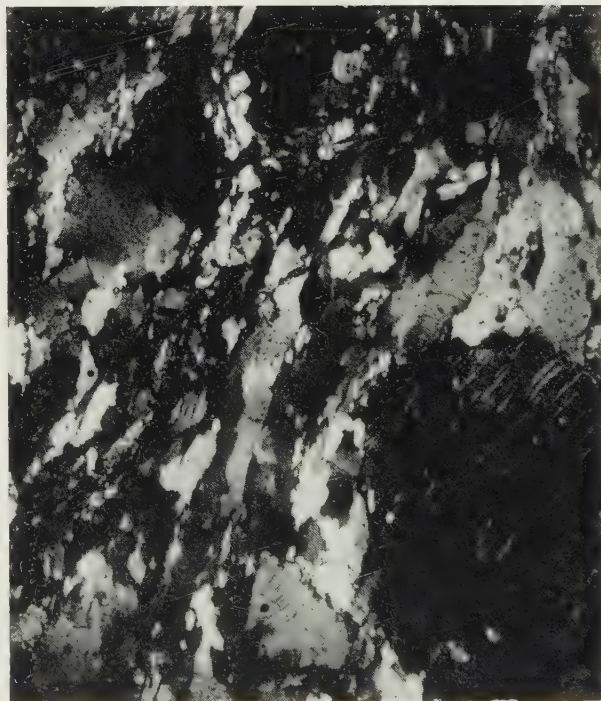
1



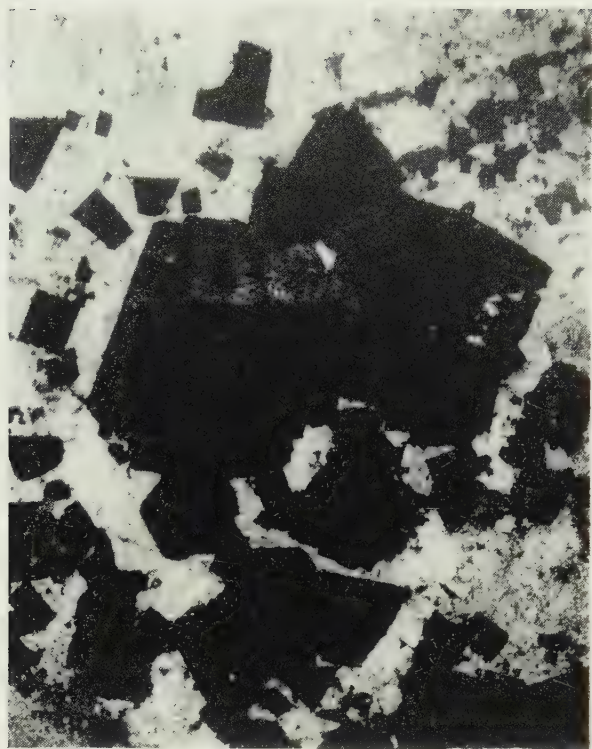
2



3



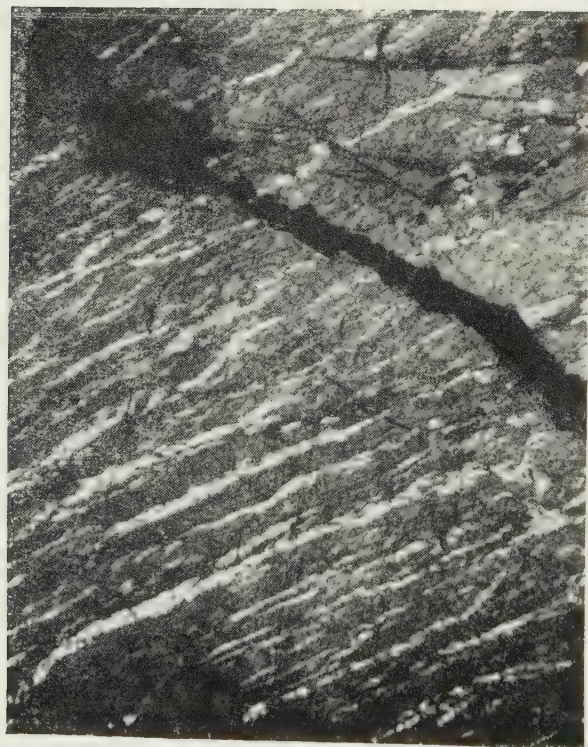
4



1



2



3



4

H. HUSSEIN. — Etude pétrographique et radiogéologique de la région située au Nord de Nantes (Loire-Atlantique)

sont bruns et de grande taille. La pennine se présente en structure fibreuse radiée (sphérolites).

Quelquefois au même affleurement, des filons aplitiques recoupent les micaschistes. Les plagioclases de ces aplites sont altérés en séricite. L'altération poussée de ces plagioclases donne parfois de la chlorite (pennine).

A la Chollière (affleurement n° 23 G 13), les micaschistes à tourmaline contiennent des filons granitiques. Le granite est à gros grain et très altéré. L'étude microscopique montre que les plagioclases de ce granite sont altérés en séricite et en pennine. En plus, la pennine contient des aiguilles allongées de rutile.

ETUDE CHIMIQUE

L'analyse chimique de quelques micaschistes a donné les résultats indiqués dans le tableau VI.

TABEAU VI

	n° 167	n° 160	n° 169	n° 171	n° 161	n° 163	n° 165
SiO ₂	75,80	70,40	56,06	72,25	45,05	65,16	62,10
Al ₂ O ₃	11,25	15,23	21,13	12,84	28,91	17,75	20,57
Fe ₂ O ₃	0,46	0,86	1,94	1,85	1,90	1,67	2,38
FeO	2,58	3,73	5,89	1,36	7,59	3,36	3,44
MnO	0,05	0,04	0,08	0,02	0,11	0,06	0,05
MgO	0,73	0,41	2,00	2,00	0,17	0,82	0,19
CaO	0,68	0,02	0,27	0,53	0,19	0,05	0,11
Na ₂ O	3,15	1,00	0,80	3,15	1,47	2,15	0,93
K ₂ O	1,68	3,36	5,88	2,40	6,85	3,55	4,80
TiO ₂	0,60	0,58	0,77	0,54	0,88	0,61	0,76
P ₂ O ₅	0,04	0,16	0,22	0,22	0,28	0,21	0,13
PF	0,82	2,16	3,18	2,26	3,70	2,17	2,88
Total	97,84	97,95	98,22	98,92	97,10	97,56	98,54

Analyse n° 167 : Echantillon n° 3 H : Micaschiste à tourmaline, Carrière du Tail-
lis, Sautron.

» n° 160 : » n° 28 H : Micaschiste au contact du granite, Les
Epinettes.

» n° 169 : » n° 139 H : Micaschistes, La Chollière.

» n° 171 : » n° 193 H : Micaschistes, Les Daudières.

» n° 161 : » n° 218 H : Micaschistes, Pont du Cens.

» n° 163 : » n° 342 H : Micaschistes, La Chapelle-sur-Erdre.

» n° 165 : » n° 375 H : Micaschistes, La Jonnelière.

PLANCHE VIII

FIG. 1 et 2. — Cristaux de pyrite dans le granite gneissique. *Microphotographie L. N.* × 40.

FIG. 3. — Pyrite (en noir) dans les fissures de la perthite. *Microphotographie L. P.* × 40.

FIG. 4. — Microcline. *Microphotographie L. P.* × 40.

Les résultats des analyses chimiques des micaschistes nous font remarquer une très grande hétérogénéité. Les micaschistes au contact du granite (analyse n° 160) montrent une certaine convergence avec le granite. Les micaschistes du Pont du Cens et de la Chollière (analyses n° 169 et 161) sont remarquables par leur teneur élevée en Al_2O_3 , FeO et K_2O . Ce sont des micaschistes riches en tourmaline et plus ou moins riches en feldspaths altérés contenant des oxydes de fer dûs à l'altération.

CONCLUSIONS

Les micaschistes du N et du NE de Nantes contiennent plusieurs minéraux intéressants : la tourmaline, la staurotide, le disthène et des grenats. Il y a une très grande hétérogénéité entre ces différents types de roches. Les micaschistes au contact du granite ont presque la même composition chimique que le granite, ce qui montre une relation étroite entre ces deux faciès.

V. — LES ACCIDENTS BASIQUES DE LA SERIE METAMORPHIQUE

Nous parlerons dans ce paragraphe de deux petites bandes d'amphibolites qui prolongent la bande de la pointe du Raz - Nantes. J. Cogné (1957) a étudié une variété d'amphibolite de la vallée de la Chézine au NW de Nantes (Carrière du Chêne Vert en Saint-Herblain). Cette variété contient un peu de diopside altéré et en grande partie transformé en amphibole.

A. Lacroix (1889) a étudié une variété d'amphibolite pyroxénique provenant de la Charterie en Saint-Herblain. Nous n'avons pas pu retrouver l'affleurement. Par contre, nous avons trouvé dans le prolongement de cette bande, à la Petite Haie en Saint-Etienne-de-Montluc (affleurement n° 53 E 6), une amphibolite contenant du diopside. Cette amphibolite est indiquée comme eclogite sur la carte géologique. L'étude microscopique indique la présence des minéraux suivants : la hornblende est très fréquente et montre des cristaux de taille assez grande qui sont arrangés en lits parallèles, entre lesquels se logent des cristaux de plagioclases (Pl. XI, fig. 3). Quelquefois, elle contient de petites inclusions de plagioclases. Au centre de ces dernières se trouvent fréquemment des cristaux de sphène associé à de l'ilmenite.

On remarque la présence de quelques petits cristaux de diopside altéré. La roche est altérée et contient des oxydes de fer dans les craquelures.

A Bois-Garo (affleurement n° 11 H 11), nous avons rencontré une variété d'amphibolite qui ressemble à celle de la Petite Haie. L'étude microscopique a montré que la hornblende est altérée. L'altération se marque par une couleur brune au centre des plages avec de petits cristaux de magnétite (Pl. XI, fig. 4).

ETUDE CHIMIQUE

L'analyse chimique d'une amphibolite de Bois-Garo a fourni les résultats donnés dans le tableau VII.

TABLEAU VII

SiO ₂	47,16	Na ₂ O	2,01
Al ₂ O ₃	13,79	K ₂ O	0,12
Fe ₂ O ₃	2,02	TiO ₂	1,32
FeO	11,12	P ₂ O ₅	0,04
MnO	0,24	Pf	0,86
MgO	8,81		
CaO	9,72	Total	97,23

Analyse n° 170 : Echantillon n° 172 H : Amphibolite

P. Lapadu-Hargues (1953) a essayé de séparer les ortho et les paraamphibolites en se basant sur des différences de composition d'éléments majeurs : le fer, le magnésium et le calcium. Les orthoamphibolites dérivent d'anciennes roches éruptives, mésocrates, les paraamphibolites d'anciens sédiments riches en calcium et en magnésium.

En 1958, le même auteur a montré qu'on peut, à l'aide de la teneur en titane d'une amphibolite, tirer une conclusion intéressante sur son origine possible. La valeur critique permettant de séparer para et orthoamphibolite semble se tenir au chiffre de 0,8 % exprimé en TiO₂.

Si nous considérons la première hypothèse de Lapadu-Hargues, nous pouvons admettre que les amphibolites étudiées sont des orthoamphibolites à cause des teneurs en FeO, MgO et CaO. D'autre part, nous arrivons aux mêmes conclusions (ortho) en nous basant sur la teneur en titane qui est beaucoup plus élevée que 0,8 %.

Il semblerait donc que nous puissions conclure qu'il s'agit d'orthoamphibolite.

CONCLUSIONS

L'orientation du travail entrepris et la superficie relativement restreinte sur laquelle ont été effectuées les observations personnelles ne permettent pas de pénétrer trop avant dans les problèmes pétrogénétiques relatifs au métamorphisme et à la granitisation en Bretagne.

Nous pouvons cependant, en conclusion, replacer dans ce cadre les observations précédentes et chercher de la sorte à définir la contribution qu'elles sont susceptibles d'apporter au problème général.

L'observation pétrographique seule ne permet que des distinctions de détail parmi les diverses roches granitiques étudiées.

Par contre, dans les micaschistes, elle permet de définir une véritable série progressive dont diverses étapes sont représentées par les échantillons, d'apparence très hétérogènes, analysés dans ce travail.

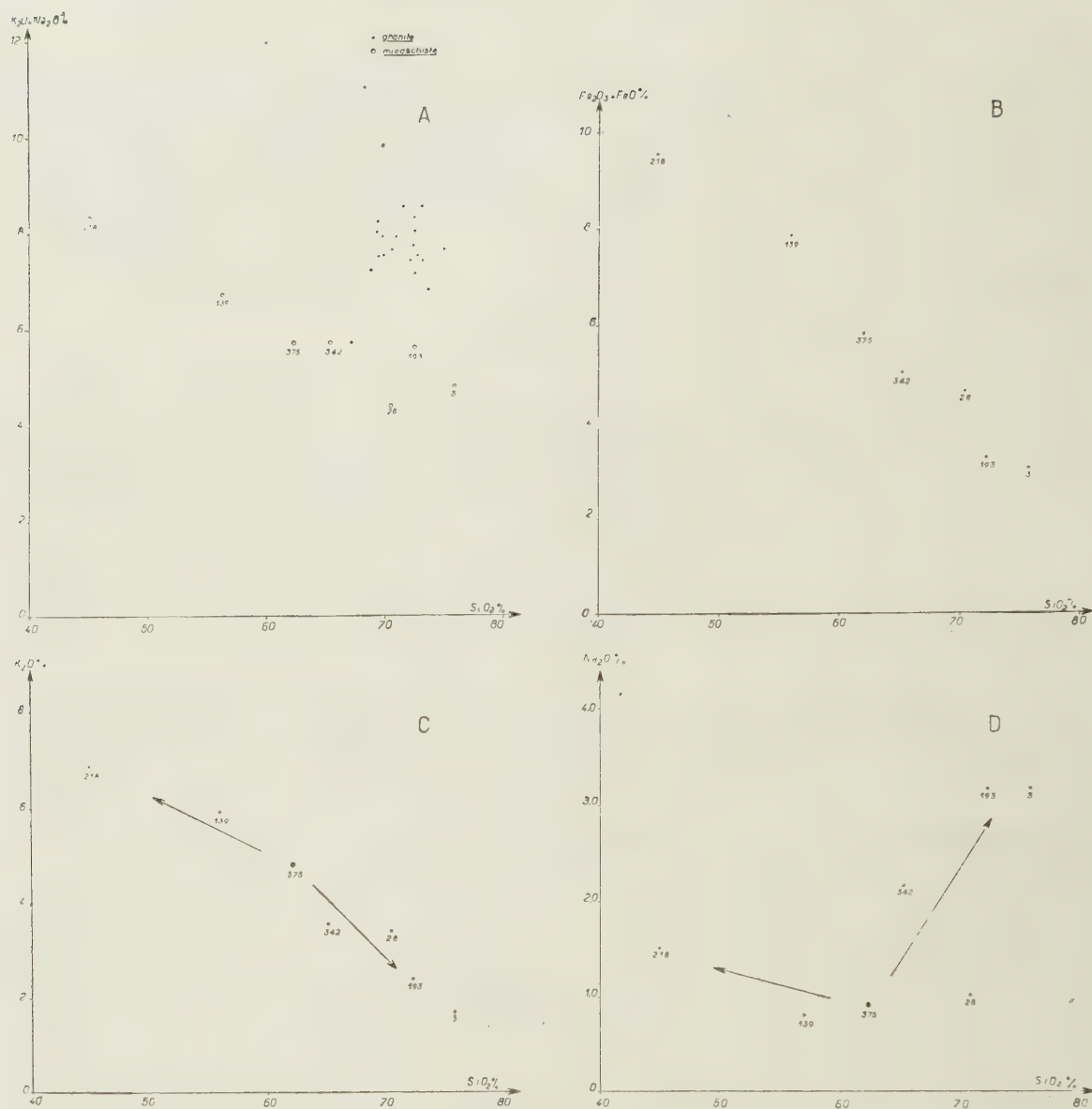


FIG. 2. — A) Relation entre $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ et SiO_2 dans les micaschistes et les granites. B) Relation entre $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ et SiO_2 dans les micaschistes. C) Relation entre K_2O et SiO_2 dans les micaschistes. D) Relation entre Na_2O et SiO_2 dans les micaschistes.

PLANCHE IX

FIG. 1. — Carrière inondée ouverte dans les micaschistes (*Carrière du Taillis, Sautron*).

FIG. 2. — Filons de quartz enfumé dans le micaschiste.

FIG. 3. — Echantillon de micaschiste avec des grands cristaux de tourmaline (*Carrière du Taillis, Sautron*).

FIG. 4. — Le micaschiste de la Jonnellière.



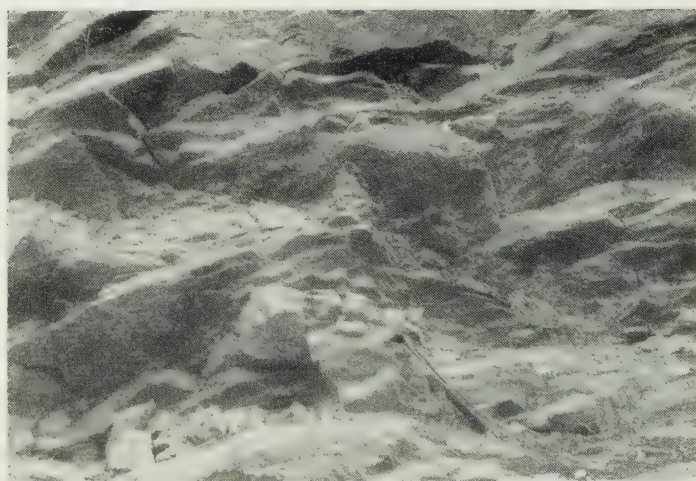
1



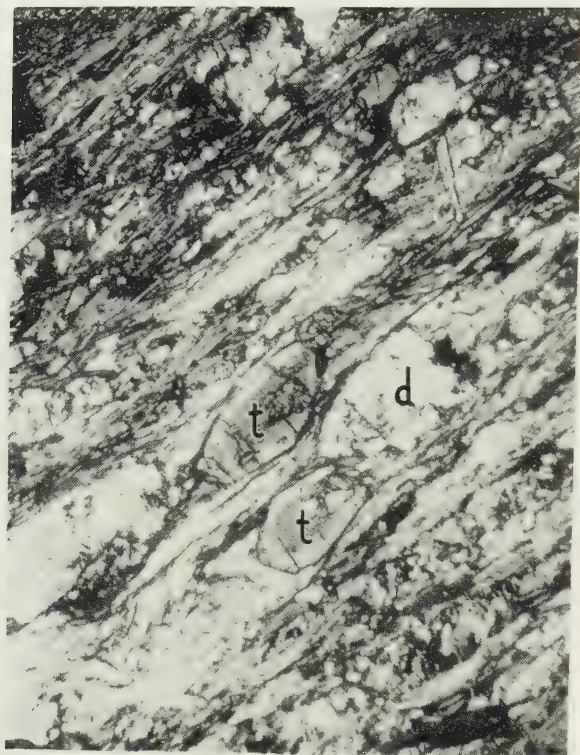
2



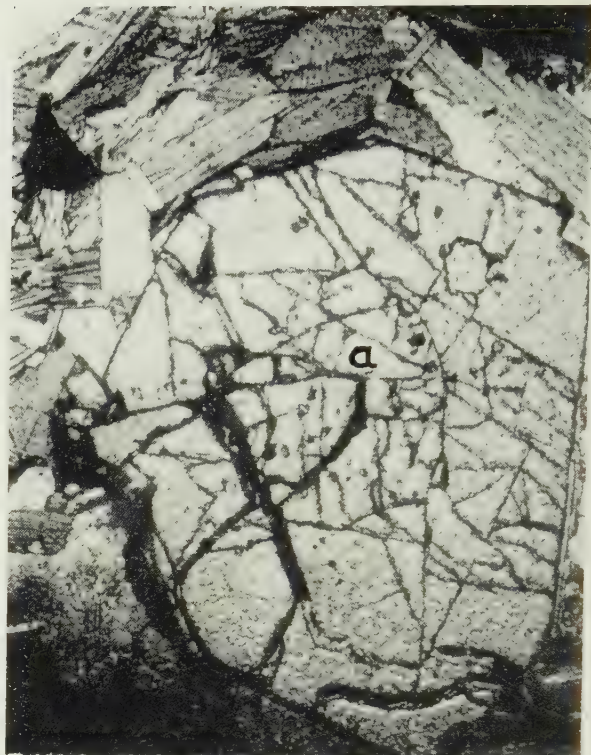
3



4



1



2



3



4

A partir du type moyen des micaschistes représentés par l'échantillon 375 H (biotite plus ou moins chloritisée et muscovite, toutes deux en cristaux peu développés, quartz en petits cristaux) (Pl. XII, fig. 1). Une hétérogénéité que l'on peut attribuer à des transformations métamorphiques se traduit :

a) par un développement de feldspaths (essentiellement plagioclases) assez rares dans l'échantillon 342 H (Pl. XII, fig. 4), abondants dans l'échantillon 193 H (Pl. XII, fig. 5).

b) par une concentration de minéraux ferromagnésiens (biotite et tourmaline) en cristaux largement développés, échantillons 139 H (Pl. XII, fig. 2) et 218 H (Pl. XII, fig. 3).

L'impression générale donnée par l'observation microscopique est confirmée par l'étude chimique.

Le graphique $(K_2O + Na_2O)/SiO_2$ (fig. 2 A) souligne en effet le groupement des roches granitiques dans une superficie restreinte du graphique, alors que les différents échantillons de micaschistes soulignent assez régulièrement sur un axe montrant une alcalinité décroissante pour les teneurs croissantes en SiO_2 .

Les graphiques complémentaires K_2O/SiO_2 (fig. 2 C) et Na_2O/SiO_2 (fig. 2 D) montrent que cette diminution de l'alcalinité est due uniquement à une diminution de la teneur relative en K_2O . La teneur en Na_2O est, au contraire, assez nettement croissante et rejoint celle que l'on rencontre de façon très générale dans les granites de la région.

Le graphique $(Fe_2O_3 + FeO)/SiO_2$ (fig. 2 B) traduit un alignement analogue ; la teneur en $(Fe_2O_3 + FeO)$ variant de façon inversement proportionnelle avec la teneur en SiO_2 .

La régularité des phénomènes observés nous permet d'affirmer que l'hétérogénéité notée dans les micaschistes n'est pas un phénomène original, mais bien, au contraire, la conséquence de véritables échanges chimiques opérés au cours du métamorphisme.

Partant du type moyen qui nous est indiqué par l'examen microscopique, les échanges se traduisent par une perte de potassium et fer dans le sens de la feldspathisation et inversement par un enrichissement en K et Fe dans les zones, peut-être voisines, jouant le rôle de « reins d'accumulation ».

Le comportement du sodium est tout autre. Partant du type moyen (échantillon n° 375 H), l'enrichissement en sodium paraît général. L'importance relative de cet enrichissement est accrue vers les types riches en silice en raison du départ de potassium et fer, elle est atténuée, mais subsiste dans les types basiques qui voient au contraire une accumulation des éléments K et Fe.

PLANCHE X

MINÉRAUX PARTICULIERS DES MICASCHISTES

FIG. 1. — Micaschiste à tourmaline (t) et à disthène (d). *Microphotographie L. N. × 40.*

FIG. 2. — Un grand cristal d'almandin (a). *Microphotographie L. N. × 40.*

FIG. 3. — Pennine sphérolitique. *Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 4. — Staurotide (s). *Microphotographie L. P. × 40.*

Nous sommes ainsi tout naturellement conduit à voir dans les transformations métamorphiques et dans la granitisation qui ont affecté la région étudiée la conséquence d'une métagénèse essentiellement sodique ou siliceuse et sodique et nous rejoignons par ce nouvel exemple précis les conclusions de bien des auteurs sur diverses parties de la Bretagne, en particulier de R. Perrin, M. Roubault et G. Sadran (1956) sur la région de Saint-Jean-du-Doigt et de J. Cogné (1957) sur l'ensemble de la Bretagne méridionale.

CHAPITRE II

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ : LES MÉTHODES UTILISÉES

GÉNÉRALITÉS

Jusqu'à présent, la radioactivité de cette région était fort peu connue et peu étudiée. C. Baret (1898) et A. Lacroix (1893-1913) signalèrent pour la première fois la présence d'autunite dans la pegmatite d'Orvault. C'était tout ce que l'on savait sur la présence d'uranium dans cette région, jusqu'au jour où le Commissariat à l'Energie Atomique, entreprenant une prospection systématique de l'uranium en Vendée, mettait à jour quelques indices uranifères à la Charpenteraie, à la Touche et à la Babinais.

Les gisements sont relativement peu importants par leur extension et leur teneur en uranium. Ils sont constitués par des minéraux secondaires d'uranium : autunite, sabugalite, chalcolite. Leur teneur en uranium varie de 0,26 à 0,90 %. Aucun de ces gisements n'a donné lieu à une exploitation rentable.

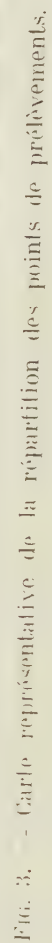
A la Touche, les indices sont localisés dans une cassure de 2 à 3 mm de puissance, minéralisée sur 10 cm environ. L'activité mesurée au compteur gamma, est de 450 chocs par seconde. A la Charpenteraie, la minéralisation, plus importante qu'à la Touche, est liée à une zone fortement arénisée de 2 m de diamètre environ. L'activité s'élève à 4.000 chocs par seconde dans la partie la plus riche.

Les études que nous nous sommes proposés de poursuivre dans cette région, ont pour but d'étudier non seulement les points minéralisés précédemment indiqués, mais aussi, d'une manière plus générale, la répartition de l'uranium dans l'ensemble des roches cristallines de cette région.

Cette région comprend le massif granitique de Vigneux-Orvault, la partie orientale de la bande Pointe du Raz-Nantes, les granites gneissiques à l'W - NW de Nantes et les micaschistes au NE de Nantes.

Outre les points minéralisés mentionnés plus haut, nous avons mis en évidence quelques autres indices de minéralisations uranifères aux points suivants :

- | | |
|--------------------------------------|---|
| — Carrière du Maroc (Vigneux) ; | — Pegmatite des « Perrières » (Orvault) ; |
| — Carrière de la Faverie (Vigneux) ; | — Granite orienté de la carrière des Bois |
| — Granite du Verdet (Orvault) ; | des Bonnes Dames en Saint-Etienne-de-Montluc. |



En ces points, nous avons trouvé une variété d'autunite en petites quantités, sous forme de placages dans les fissures et fixée surtout sur les feldspaths. En plus, signalons quelques minéralisations thorifères dans les granites gneissiques à l'W - NW de Nantes. Il s'agit de thorianite et de monazite.

Echantillonnage.

L'échantillonnage, qui est un facteur important pour toute étude systématique de la distribution de l'uranium dans les roches, a été très difficile à réaliser. En effet, la région est entièrement recouverte de végétation et d'une épaisse couche de terre arable, ce qui réduit le nombre d'affleurements ; de plus, nombre de carrières sont abandonnées ou immergées et sont donc d'un accès très difficile, voire impossible. Nous avons pu, malgré tout, prélever plus de six cents échantillons pour l'ensemble de la région.

Souvent pour un même affleurement, nous avons été amené à prélever plusieurs échantillons à cause des différents faciès que l'on pouvait y observer. Aussi, nous avons prélevé jusqu'à quarante échantillons en certains points.

Afin de travailler dans des conditions assez identiques d'un point à un autre, nous avons pris des échantillons de poids voisin (environ un kilogramme).

Préparation des échantillons.

Après prélèvement, les échantillons sont préparés pour les analyses radiométriques et chimiques.

Chaque échantillon est broyé dans un broyeur à mâchoires ; le broyat obtenu est soumis à un deuxième broyage dans un broyeur à marteaux qui permet d'obtenir un deuxième broyat, dont les grains les plus gros ne dépassent pas 1 mm de diamètre. Une partie de ce broyat, environ 50 g obtenus par quartage, est porphyrisé dans un mortier en porcelaine (Retsch porcelaine), puis dans un mortier en agate (Retsch agate). On obtient finalement une poudre dont les grains n'ont pas plus de 0,2 mm de diamètre. Pour chaque échantillon, nous obtenons donc deux fractions :

— Une fraction dont la taille des grains ne dépasse pas 1 mm de diamètre ; elle est destinée à la pose de plaques nucléaires pour déterminer la teneur globale de l'uranium de l'échantillon ;

— Une fraction porphyrisée dont la taille des grains ne dépasse pas 0,2 mm, destinée aux analyses chimiques, fluorimétriques et spectrographiques.

Méthodes et mesures.

L'étude de la radioactivité de la région comportera les points suivants :

1. — Mesure des rayonnements gamma au compteur G. M.
2. — Mesure de la radioactivité globale des roches par la méthode des plaques nucléaires.

3. — Etude de la répartition de la radioactivité dans les roches par autoradiographie de plaques minces.
4. — Détermination de la teneur en uranium par la méthode fluorimétrique.

ÉTUDE DES RAYONNEMENTS GAMMA AU COMPTEUR G.M.

METHODE

Les mesures d'activité gamma ont été faites à l'aide d'un compteur Geiger (S. R. A. T. G. M. T. 14), qui donne directement les mesures en chocs/s A. V. P. Nous avons relevé, à chaque affleurement, les indications du compteur toutes les trois secondes et pris la moyenne de trente mesures.

Dans les cas de grandes carrières, il nous a semblé bon de faire plusieurs stations de mesures, afin de mieux apprécier les variations possibles d'activité le long du front de taille.

Cette façon d'opérer est même nécessaire quand les roches qui affleurent présentent des faciès différents d'un point à un autre de l'affleurement.

L'activité enregistrée par un compteur en un point donné dépend de deux facteurs : — la radioactivité des roches due essentiellement à la présence de l'uranium, de thorium et en faible proportion du K 40; — les rayonnements cosmiques, dont l'intensité est variable suivant les saisons et la température.

M. Roubault et R. Coppens (1957) ont montré que l'activité enregistrée par un compteur en un point donné d'un massif granitique se décomposerait approximativement de la façon suivante :

Rayonnements cosmiques	: 15 chocs/s A. V. P.
Potassium 40	: 3 chocs/s A. V. P.
Uranium et thorium	: 12 chocs/s A. V. P.

Les mêmes auteurs admettent une moyenne de 30 chocs/s A. V. P. pour l'activité normale d'un granite du massif de Carnac (Bretagne).

RESULTATS

Sur les différents affleurements que nous avons rencontrés, nous avons effectué cent neuf mesures. Il ressort de ces mesures que l'activité de la région étudiée est assez variable, mais sans présenter toutefois, des limites excessives. la figure 4 montre une carte de la distribution de l'activité gamma.

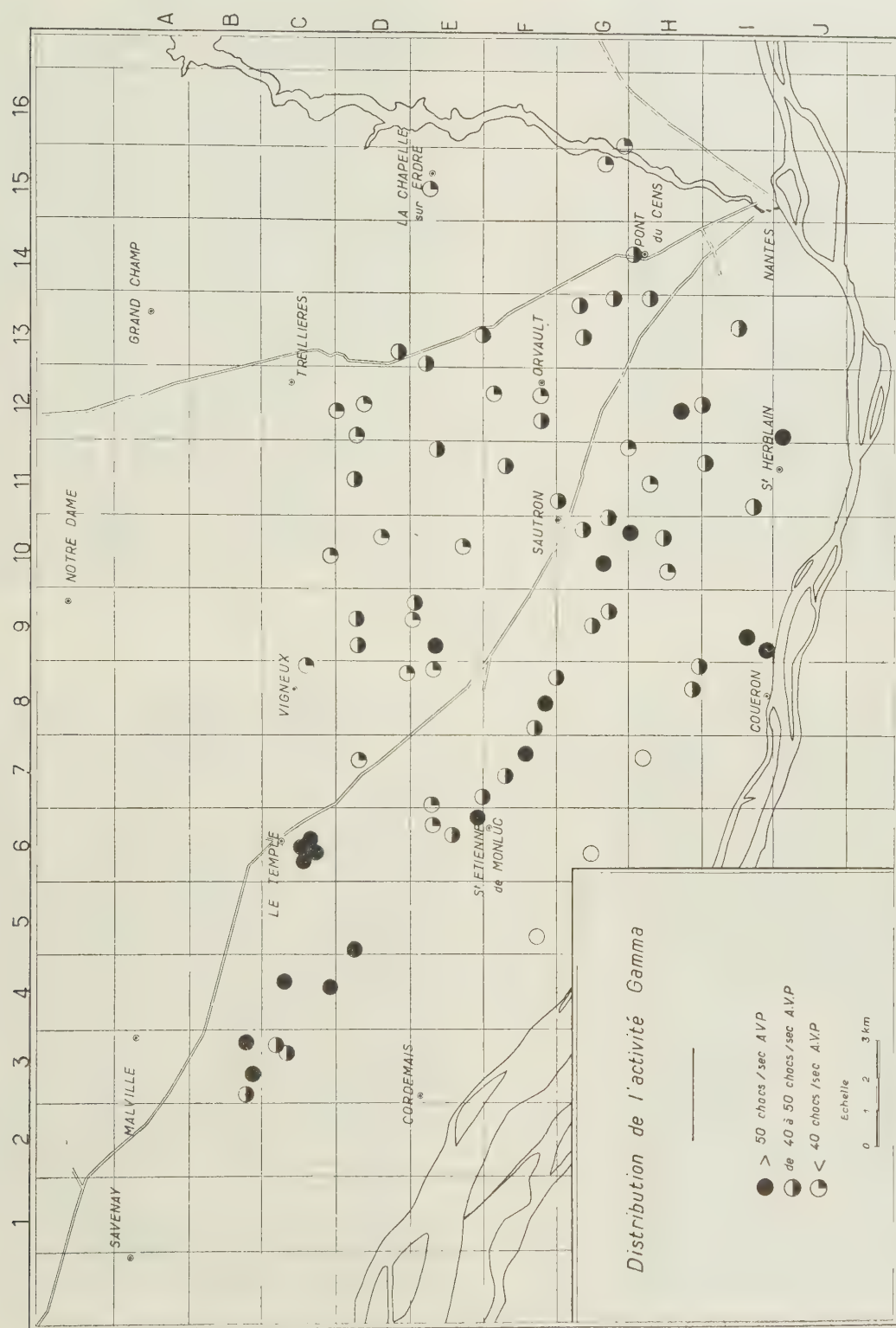


FIG. 4. — Carte représentative de la distribution de l'activité gamma.

Dans ce qui suit, nous considérerons l'activité des trois principaux faciès pétrographiques de la région : granites, granites gneissiques, roches métamorphiques.

1. — L'ACTIVITE DANS LES GRANITES

Les différentes mesures effectuées dans les granites montrent que l'activité varie entre 31 et 65 chocs/s A. V. P. La moyenne arithmétique de ces mesures est de 38,5 chocs/s ; comparée à l'activité normale d'un granite du massif de Carnac, on constate que l'activité moyenne des granites de notre région est un peu plus élevée.

Si nous admettons que l'erreur due au compteur est de l'ordre de 10 %, nous pouvons en déduire que l'activité moyenne des granites peut être comprise entre 34 et 42 chocs/s A. V. P.

En ce qui concerne nos mesures, et afin de simplifier nos estimations, nous considérerons comme normale l'activité moyenne de 38,5 chocs/s A. V. P. En nous basant sur cette donnée, nous diviserons l'activité des granites en trois catégories :

- granites à activité faible : < 34 chocs/s A. V. P.
- granites à activité moyenne : 34 - 42 chocs/s A. V. P.
- granites à activité forte : > 42 chocs/s A. V. P.

On trouvera les résultats des mesures d'activité gamma des granites dans le tableau ci-dessous (Tabl. VIII).

Discussion des résultats.

Les résultats d'activité dans les granites, exprimés dans ce tableau, montrent que plusieurs affleurements présentent de fortes activités.

Dans un certain nombre d'affleurements, nous avons effectué des mesures plus détaillées. Par exemple, dans la Carrière du Maroc (affleurement n° 48 E 8), nous avons relevé les indications du compteur tous les cinq mètres, à cause de la présence de différents faciès du granite. Au sujet de cette carrière, nous ferons les observations suivantes :

— Au contact du granite gris et des filons pegmatitiques, l'activité est toujours beaucoup plus élevée que dans les filons proprement dit ou que dans le granite encaissant.

PLANCHE XI

FIG. 1. — Concentration de biotite dans le micaschiste du Pont du Cens. *Microphotographie L. P.* $\times 40$.

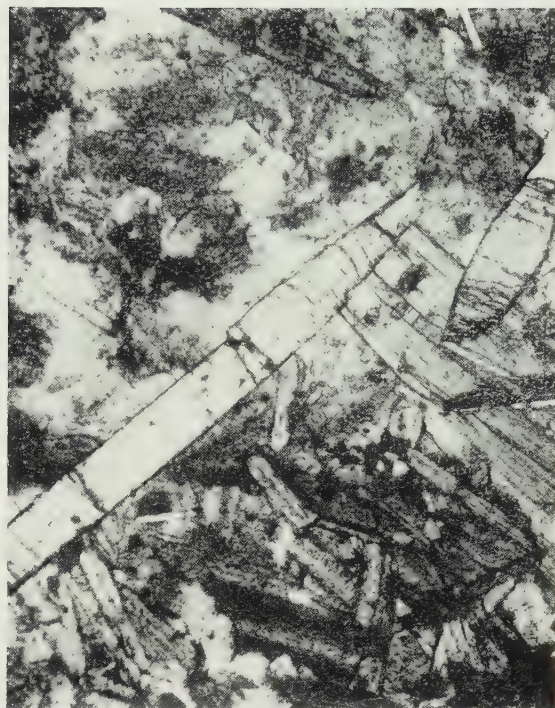
FIG. 2. — Baguettes de tourmaline dans le micaschiste du Pont du Cens. *Microphotographie L. P.* $\times 40$.

FIG. 3. — Amphibolite altérée. *Microphotographie L. N.* $\times 40$.

FIG. 4. — Grand cristal de hornblende avec altération périphérique. *Microphotographie L. N.* $\times 40$.



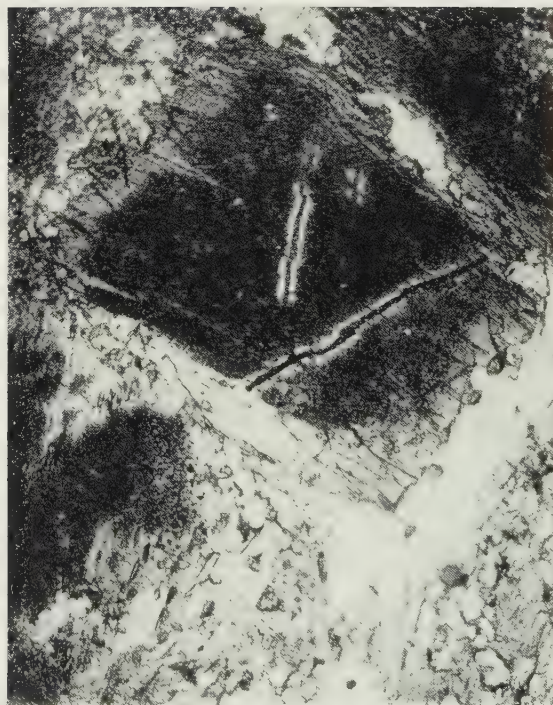
1



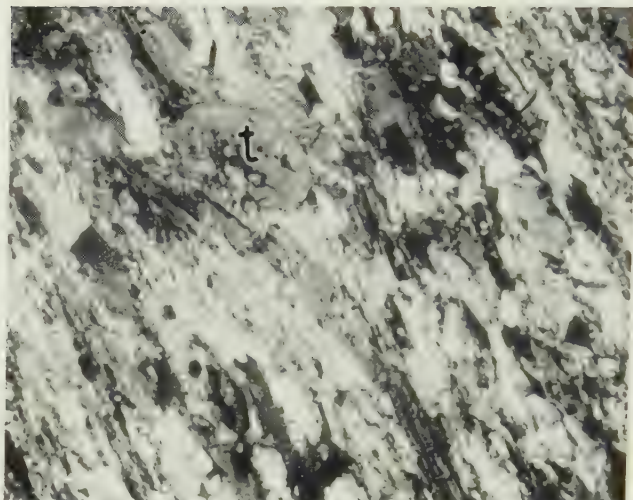
2



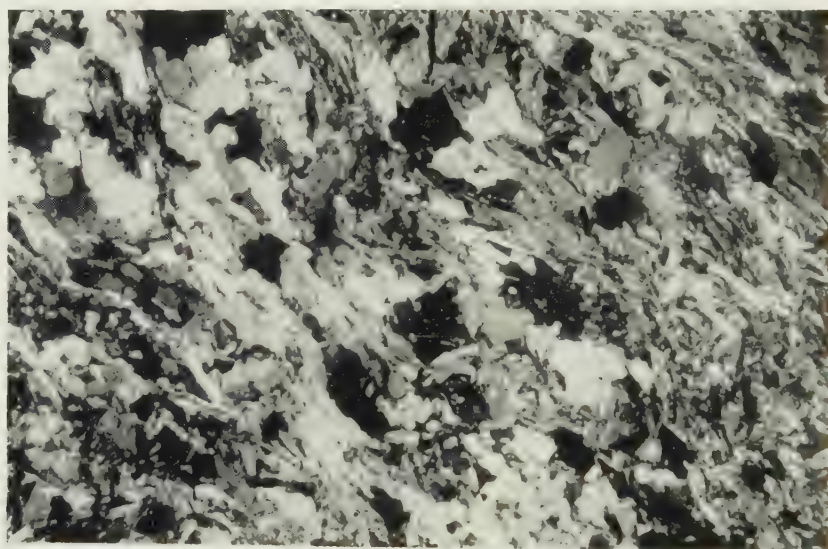
3



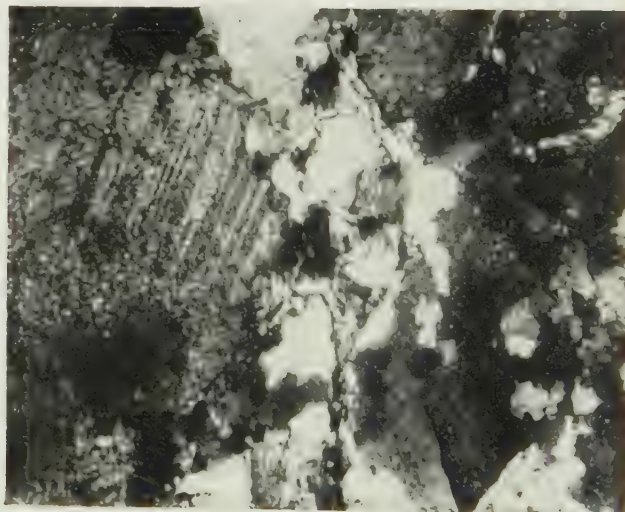
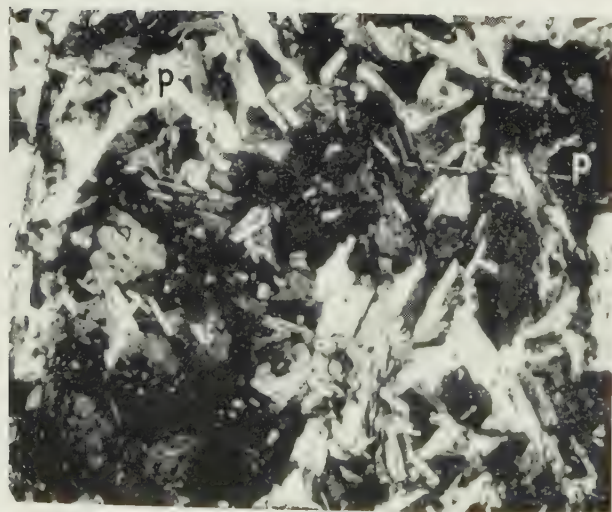
4



3



1



5

— Nous avons remarqué quelques filons d'argile remplissant des cassures dans le granite. Ces argiles présentent une activité élevée d'environ 60 chocs/s A. V. P.

— Le granite peu altéré contenant des filonnets de quartz enfumé a une activité plus élevée par rapport au granite de cette carrière (45 à 55 chocs/s A. V. P.).

Nous pouvons faire les mêmes observations en ce qui concerne la carrière de la Faverie du Buron (affleurement n° 46 E 9). C'est dans ces deux endroits précédemment cités que nous avons signalé (Coppens et Hussein, 1957) la présence d'une minéralisation uranifère localisée sur les feldspaths sous forme de placages surtout au contact du granite gris et des filons pegmatitiques.

D'autre part, parmi les autres points à forte activité, nous distinguerons :

1) Des granites contenant des minéralisations uranifères. A la Charpenteraie, à la Touche et à la Babinais où se présente l'autunite, la chalcophile et la sabugalite, l'activité est très forte et atteint jusqu'à 1.000 chocs/s. Aux Perrières et au Verdet, l'activité est de l'ordre de 60 chocs/s à cause de la présence de petites quantités d'autunite sous forme de placage.

2) Des granites orientés près du contact avec les micaschistes.

3) Des granites riches en biotite contenant de nombreux petits cristaux de minéraux accessoires (zircon, apatite, etc...) entourés de halos pléochroïques.

Les points à activité normale ne présentent aucune des particularités ci-dessus énumérées. C'est le cas par exemple, de la pegmatite d'Orvault et du granite à gros grains des environs de Vigneux qui ont une activité normale ne dépassant pas 40 chocs/s.

Conclusions.

D'après l'étude du rayonnement gamma sur les granites, nous remarquons que l'activité du granite étudié est relativement élevée par rapport à l'activité normale des granites de Bretagne. L'activité la plus forte se situe aux contacts, en particulier, au contact des filons pegmatitiques et du granite, et au contact des granite et des micaschistes.

Par contre, les mesures ont montré que les pegmatites ont une faible activité par

PLANCHE XII

LES DIFFERENTS TYPES DE MICASCHISTES

FIG. 1. — Micaschiste d'un type moyen, *Echantillon n° 375 H. Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 2. — Micaschiste à tourmaline (t), *Echantillon n° 139 H. Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 3. — Micaschiste très riche en tourmaline (t), *Echantillon n° 218 H. Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 4. — Micaschiste contenant quelques petits cristaux de plagioclase (p), *Echantillon n° 342 H. Microphotographie L. P. × 40.*

FIG. 5. — Micaschiste avec gros cristaux de plagioclase, *Echantillon n° 193 H. Microphotographie L. P. × 40.*

TABLEAU VIII

<i>Localisation</i>	<i>N° des affleurements</i>	<i>Activité gamma (chocs/s A.V.P.)</i>	<i>Activité relative</i>	<i>Observations</i>
La Pelleire	3 I 12	47	Forte	Granite à deux micas riche en biotite.
La Rivaudière	4 I 12	45 - 55	Forte	" " "
La Contrie	7 I 9	45	Forte	" " "
Bas-Village	10 H 12	45 - 60	Forte	" " "
Fossé Neuf	13 H 10	55 - 65	Forte	Granite près des micaschistes
Bois David	14 H 10	48	Forte	
Fuy	25 G 10	44	Forte	Granite près des micaschistes
Le Tertre	27 G 10	50 - 55	Forte	" " "
Saint-Savin	28 G 9	44 - 60	Forte	Granite légèrement orienté.
	29 G 9			
	30 G 8			
	37 F 8			
	38 F 8			
	39 F 7			
Orvault	33 F 12	35	Normale	Granite et pegmatite à tourmaline.
Les Perrières	34 F 12	33 - 40	Normale	" " "
Les Epinettes	36 F 11	39	Normale	" " "
La Guichardière	43 E 13	42	Normale	" " "
Verdet	44 E 11	55 - 65	Forte	Granite à autunite.
La Feverie	46 E 9	45 - 65	Forte	" " "
Bellevue (Vigneux)	47 E 9	35	Normale	
Le Maroc	48 E 9	32 - 60	Forte	Granite à autunite.
La Babinière	49 E 8	38	Normale	
Les Moulins	50 F 7	39	Normale	
Carrière des Bois des Bonnes Dames (Saint-Etienne de Montluc)	52 E 6	50 - 55	Forte	Granite à autunite.
La Petite Haie	53 E 6	42	Normale	
Belle Vue (Saint-Etienne de Montluc)	54 E 6	40	Normale	
Le Brulis	55 D 13	46 - 55	Forte	Granite riche en biotite.
Garambeau	56 D 12	36	Normale	
La Bernardais	58 D 12	36	Normale	
La Primaudière	59 D 12	45 - 60	Forte	Granite riche en biotite.
Le Prusot	60 D 10	39	Normale	
Malescot	61 et 62 D 9	41 - 60	Forte	Granite riche en biotite.
La Roche	63 D 8	38	Normale	
La Biliais Déniaud	64 D 7	31	Faible	
La Haie Meriais	65 D 5	55	Faible	
La Bouvardière	66 C 10	38	Normale	
Vigneux	67 C 8	39	Normale	
La Plaisance	68 C 6	55	Forte	Granite orienté.
	69 C 6			
	70 C 6			
La Charpenteraie	72 C 4	120 - 150 → 1000	Très forte	Granite à autunite.
La Guay	73 C 4	45 - 60	Forte	
Le Prévot	74 C 3	50 - 55	Forte	
La Noë	75 C 3	50 - 55	Forte	
La Babinais	76 B 3	200 - 250	Très forte	Granite à autunite.
La Touche	77 B 3	50 - 60	Forte	Granite (à autunite ?)

rapport aux granites en contact avec elles. Nous avons remarqué que la présence de quelques petits filons de quartz enfumé dans le granite augmente l'activité et que le granite orienté ou riche en biotite a généralement une forte activité. Finalement, il ressort de ces différentes constatations que l'activité d'un massif granitique n'est pas très homogène.

2. — L'ACTIVITE DANS LES GRANITES GNEISSIQUES

Les mesures faites au compteur dans les granites gneissiques de l'W - NW de Nantes ont montré une activité plus élevée que celle des granites voisins. Cette activité varie entre 50 et 80 chocs/s A. V. P., pouvant atteindre 100 chocs dans certains cas. Les mesures d'activité que nous avons faites dans les granites gneissiques concernent les trois affleurements suivants :

La Pompière : 50 à 100 chocs/s A. V. P.

La Gatine : 60 à 80 chocs/s A. V. P.

Le Bouillon : 50 à 60 chocs/s A. V. P.

L'activité augmente particulièrement dans les granites gneissiques riches en pyrite et en fluorine violette. En outre, ces roches sont plus ou moins riches en cristaux microscopiques de monazite. Nous avons remarqué que, dans la plupart des cas, l'association de la pyrite et de la fluorine violette est accompagnée d'une minéralisation thorifère.

En effet, à la Gatine, nous avons rencontré dans les granites gneissiques à feldspaths roses, des petits cristaux d'un minéral de thorium, très probablement de la thorionite.

De plus, aux Daudières, nous remarquerons tout particulièrement la présence en petites quantités de l'allanite.

Nous avons remarqué que l'activité est élevée dans les fissures des granites gneissiques. C'est dans ces fissures qu'on rencontre souvent des minéralisations assez importantes.

Par la suite, nous reprendrons plus en détail l'étude de ces minéralisations uranifères et thorifères (Chap. III).

Conclusions.

1) L'activité gamma est beaucoup plus élevée dans les granites gneissiques (environ 60.-70 chocs/s) que dans les granites (environ 38 chocs/s).

2) Il semble que les conditions de formation de ces granites gneissiques aient été favorables à la formation de certaines minéralisations uranifères ou thorifères.

3) L'activité dans les granites gneissiques est plus élevée dans les fissures, car des minéralisations assez importantes y sont fréquentes.

3. — L'ACTIVITE DANS LES ROCHES METAMORPHIQUES

Dans les roches métamorphiques, les différentes mesures qui ont été faites au compteur, montrent une variation d'activité comprise entre 22 et 45 chocs/s, moyenne voisine de celle du granite. Si on admet, comme dans le cas des granites, que l'erreur due au compteur est de l'ordre de 10 %, on peut considérer que l'activité moyenne des roches métamorphiques étudiées, se situe entre 34 et 42 chocs/s.

Les résultats des mesures faites au compteur sont données dans le tableau IX.

TABLEAU IX

<i>Référence</i>	<i>Numéro des affleurements</i>	<i>Activité gamma en chocs/s A.V.P.</i>	<i>Observations</i>
Pont du Cens	8 H 14	44	Micaschiste à tourmaline.
La Grande Ferrière	9 H 13	40	Micaschiste.
La Briquéttrie	15 H 10	37	Quartz.
La Jonnelière	19 G 16	33-42	Micaschiste.
	et 20 G 16		
Belle-Vue (Pont du Cens)	21 G 13	45	Micaschiste à tourmaline.
La Chollière	23 G 13	40	Micaschiste.
Carrière du Taillis	24 G 11	42	Micaschiste à tourmaline.
La Petite Haie	51 E 7	22	Amphibolite.

Discussion des résultats.

D'après ce tableau, nous remarquons que les micaschistes ont une activité normale si on prend comme base de référence l'activité normale du granite voisin. On voit de plus, que l'activité de ces micaschistes est homogène. Cependant, dans certains cas, elle est un peu plus élevée à cause de la présence des cristaux de tourmaline. En effet, l'étude d'autoradiographies de plaques minces, dont nous parlerons plus loin, a montré dans la tourmaline la présence de petites taches de couleur plus foncée dont le centre est occupé par de petits cristaux peu radioactifs. D'autre part, les mesures faites sur l'amphibolite de la Petite Haie ne donnent que 22 chocs/s, ce qui représente une activité très faible. Enfin, le filon de quartzite qui affleure à la Briquéttrie a une activité voisine de celle des micaschistes.

Conclusions.

- 1) Les micaschistes ont une activité homogène, voisine de 38 chocs/s.
- 2) Ceux qui contiennent de la tourmaline ont une activité un peu plus élevée que les autres.
- 3) Par contre, l'amphibolite a une activité plus faible que les micaschistes.

CONCLUSIONS GENERALES

- 1) Les granites et les micaschistes de la région étudiée ont une activité moyenne d'environ 38 chocs/s A. V. P., elle est un peu plus élevée que l'activité moyenne des granites.
- 2) L'activité du granite est, en général, assez forte. Elle peut atteindre, dans des cas exceptionnels des valeurs élevées : c'est le cas à la Charpenteraie (affleurement n°

72 C'4) où l'on enregistre 1.000 chocs/s. Dans ce cas précis, l'activité élevée est due à la présence de minéraux d'uranium tels que : autunite, chalcophile, sabugalite (C. E. A.), ancien gisement abandonné.

3) Très souvent, au contact du granite et des filons pegmatiques, l'activité est plus élevée que dans le massif même, car ces contacts présentent, dans certains cas (le Maroc, la Faverie du Buron), des minéralisations uranifères sous forme de placages (variétés d'autunite).

4) Les granites gneissiques, avec 60 - 80 chocs/s A.V.P. ont une activité bien plus élevée que les granites et les micaschistes, car ils contiennent un certain nombre de minéralisations uranifères et thorifères qu'on ne trouve pas dans les granites ; ce sont surtout de la thorianite, de la monazite et de l'allanite et même de la pyrite radioactive.

5) Les micaschistes à tourmaline ont une activité plus élevée que les micaschistes qui en sont dépourvus, car la tourmaline contient de petites inclusions radioactives.

6) Les amphibolites, enfin, ont une activité plus faible que celle des micaschistes.

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ PAR LA MÉTHODE DES ÉMULSIONS NUCLÉAIRES

GENERALITES

L'action des rayons s'échappant d'un corps radioactif sur l'émulsion photographique est bien connue puisque c'est elle qui a conduit Henri Becquerel (1896) à découvrir la radioactivité. Jusqu'à ces dernières années cependant, elle se limitait à un voile plus ou moins important, le grain trop gros des émulsions employées ne permettant ni de distinguer les trajectoires, ni de faire une numération, même approximative, des rayons émis.

Par suite de l'augmentation de la concentration en bromure d'argent et de certaines modifications de la technique de fabrication, on possède actuellement des plaques sensibles, dites plaques pour recherches nucléaires, à grain très fin, dont le voile chimique est considérablement réduit et qui permettent de « photographier » les particules nucléaires et cosmiques.

Il est possible, en particulier, avec de telles émulsions, d'obtenir les trajectoires des particules alpha : il suffit de les laisser au contact d'un corps radioactif. Après un développement simple, mais qui demande quelques précautions, on peut voir sur cette émulsion, par observation au microscope, des traces en forme de traits rectilignes dont la longueur varie de quelques dizaines de microns. Un fort grossissement permet de constater que ces traits sont formés d'une suite de grains noircis dont le diamètre atteint 0,2 μ .

Ces plaques nucléaires ont été utilisées avec succès pour l'étude de la radioactivité, on se trouve généralement en face de deux problèmes également importants : le dosage

de faibles quantités d'uranium et de thorium et l'examen de la distribution des éléments radioactifs.

Ces deux problèmes peuvent être résolus aisément par la plaque photographique nucléaire. Cette plaque enregistre, en effet, les rayons alpha un à un et il est bien évident que le nombre de rayons alpha émis par une substance croît avec sa concentration en matières radioactives et est proportionnel au temps de pose.

Un corps naturel contenant une très faible proportion d'élément radioactif peut donc, en principe, donner, sur une émulsion photographique, un très grand nombre de rayons alpha à condition de le laisser en contact avec cette plaque pendant une durée suffisamment longue.

D'autre part, les rayons alpha de chaque émetteur ont une longueur bien définie. En mesurant les longueurs des trajectoires émises par un corps radioactif, il sera possible de distinguer l'uranium du thorium. Il sera aussi possible de reconnaître si un corps est en équilibre ou s'il ne l'est pas.

La plaque nucléaire permet aussi de déterminer la répartition de l'activité et c'est là certainement, l'un de ses grands avantages, car il semble que ce soit, à l'heure actuelle, la seule méthode permettant d'arriver à un résultat aussi précis.

Une répartition diffuse de la radioactivité des roches se traduira sur l'émulsion, par une répartition uniforme des rayons alpha ; chaque champ de microscope montrera, aux fluctuations statistiques près, le même nombre de trajectoires. Au contraire, toute concentration de l'activité se traduira par un amas de trajectoires alpha. On peut aussi déceler la présence d'inclusions très fines dont les dimensions sont souvent de l'ordre de quelques microns.

La méthode des plaques nucléaires peut être utilisée de deux manières différentes pour un même échantillon :

- 1) Après broyage de l'échantillon, nous avons déterminé la radioactivité globale de la roche, avec la poudre obtenue.
- 2) Une autoradiographie d'une lame mince taillée dans la même roche, nous a permis de déterminer la répartition des éléments radioactifs.

DETERMINATION DE LA RADIOACTIVITE GLOBALE

METHODE

Au moment de la porphyrisation de la roche, les échantillons peuvent perdre une partie de leur radioactivité par suite de la perte de radon et de thoron. Pour cette raison, chaque échantillon est broyé et la taille des grains ne dépasse pas un mm. Cette poudre est répartie uniformément en une couche de quelques millimètres d'épaisseur sur une plaque nucléaire dont la surface est de 6 cm². Chaque échantillon est posé pendant trois jours dans l'obscurité, puis les plaques sont développées en utilisant des solutions spéciales.

COMPOSITION DES SOLUTIONS.

1. — <i>Révéléateur</i> . — Solution A :	K ₂ CO ₃	100 g
	Sulfite de Na anhydre	20 g
	K Br à 10 %	10 cm ³
	H ₂ O	1.000 cm ³
Solution B :	Hydroquinone	1 g
	Eau	1.000 cm ³

2. — *Bain d'arrêt*. — Solution d'acide acétique à 2 % dans l'eau distillée.

3. — *Fixateur*. — Solution à 35 % d'hyposulfite de Na dans l'eau distillée.

Le développement se fait à 18° C et comprend les opérations suivantes :

— Pendant vingt minutes, les plaques nucléaires sont révélées dans un mélange constitué des mêmes quantités de solution A et B.

— Lavage à l'eau distillée.

— Les plaques sont ensuite placées dans un bain d'arrêt pendant cinq minutes.

— Lavage à l'eau distillée.

— Fixation des plaques durant trente à quarante-cinq minutes jusqu'à ce qu'elles deviennent transparentes.

— Rinçage à l'eau courante pendant une trentaine de minutes.

— Nettoyage des plaques nucléaires avec un coton humide. Cette opération nécessite quelques précautions, et a pour but de détacher les grains qui pourraient rester collés sur la gélatine et gêneraient l'observation microscopique.

— Séchage des plaques à l'abri de la poussière.

ETUDE DES PLAQUES NUCLEAIRES

Il est nécessaire, tout d'abord, de repérer sur chaque plaque nucléaire, les inclusions venant de la présence des grains radioactifs de la roche (par exemple, zircon, monazite, apatite, etc...). Ensuite, nous avons choisi un carré de 0,25 cm² pour compter les traces alpha. Pour choisir ce carré, il faut trouver un endroit contenant un nombre d'inclusions proportionnel au nombre total d'inclusions repérées sur la plaque. Supposons que nous ayons trouvé vingt quatre inclusions sur toute la plaque, c'est-à-dire pour une surface de 6 cm², il faut que le carré de 0,25 cm² choisi, ait une seule inclusion.

Pour compter les traces alpha, il faut tenir compte des traces parasites qui se trouvent sur les plaques nucléaires et qui sont dues à la radioactivité de l'émulsion photographique. Avec une certaine habitude, il est facile de distinguer les traces parasites des autres traces réelles émanant de la roche même, si le grossissement du microscope est assez fort.

CALCULS

Le corps à étudier est mis au contact de l'émulsion pendant une durée plus ou moins longue pouvant varier de quelques minutes pour un minerai à forte teneur à quelques mois pour les roches à faible radioactivité. La numération de traces des rayons alpha permet de calculer le nombre N d'alpha par centimètre carré et par seconde.

R. Coppens (1950) a donné les formules suivantes pour déterminer la teneur en uranium et en thorium :

$$N = 9,20 \text{ U } K' \text{ (si l'uranium est seul),}$$

$$N = 2,64 \text{ Th } K' \text{ (si le thorium est seul),}$$

$$N = (9,20 \text{ U} + 2,64 \text{ Th}) K' \text{ (s'il y a, à la fois, uranium et thorium), d'où :}$$

$$N = 17,12 \text{ U } K' \text{ (en tenant compte que le rapport Th/U est égal à 3).}$$

Dans ces formules, U et Th représentent les pourcentages d'uranium et de thorium et K' un coefficient d'absorption qui dépend de la composition chimique de la roche. Ces relations ont été calculées en admettant que l'uranium et le thorium se trouvent en équilibre radioactif avec leurs descendants.

Nous avons calculé K' pour les granites et pour les micaschistes et nous avons trouvé une valeur égale à 15. E. Picciotto (1949) considère K pour les granites comme égal à 12,7 ; R. Coppens (1950) prend la valeur 16.

Si nous prenons $K' = 15$ dans la formule précédente, nous aurons :

$$N = 17,12 \text{ U } 15 \qquad N = 256,8 \text{ U}$$

ce qui donne :

$$U = N : 256,8 \pm 0,004 N$$

DISTINCTION ENTRE THORIUM ET URANIUM

Si le corps considéré contient à la fois du thorium et de l'uranium, les rayons alpha de plus long parcours sont ceux du ThC' (8,57 cm dans l'air ou 46 μ dans l'émulsion), du RaC (6,91 cm ou 39 μ), de l' AcA (6,47 cm) et du ThA (5,64 cm ou 32 μ).

Donc les traces qui mesurent plus de 39 μ dans l'émulsion sont dues au ThC' et le fait de les rencontrer implique nécessairement la présence de thorium. Les traces ayant dans l'émulsion un parcours compris entre 32 μ et 39 μ sont soit celles du ThC' partiellement absorbées, soit celles du RaC' ou de l'actinium.

ERREURS DE LA METHODE DES PLAQUES NUCLEAIRES

Cette méthode des plaques nucléaires effectuée sur les poudres, aussi précise qu'elle soit, n'est pas exempte d'erreurs qui sont dues à différents facteurs :

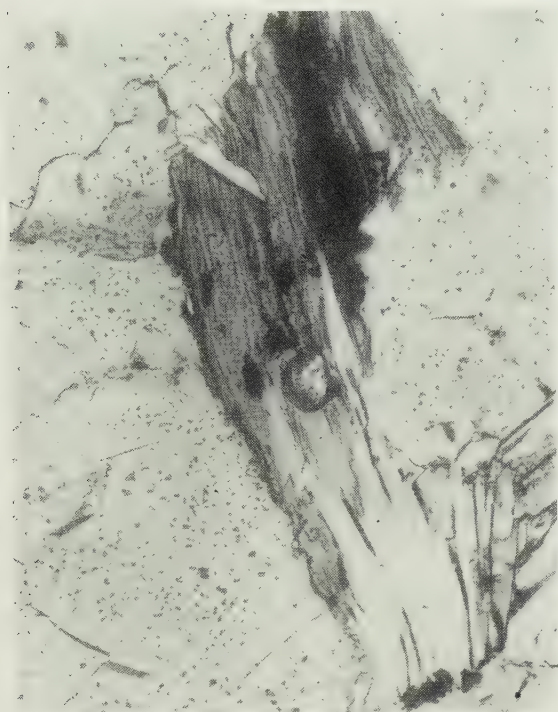
PLANCHE XIII

Fig. 1 a. — Zircon dans une biotite altérée. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

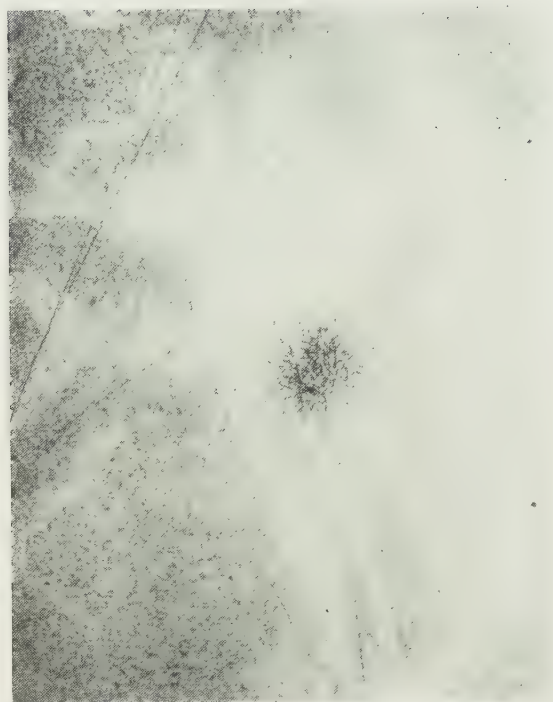
— 1 b. — Autoradiographie de cette biotite montrant des traces alpha dues au zircon et quelques traces dues aux oxydes de fer. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours).*

Fig. 2 a. — Zircon entouré d'un halo pléochroïque dans une biotite. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

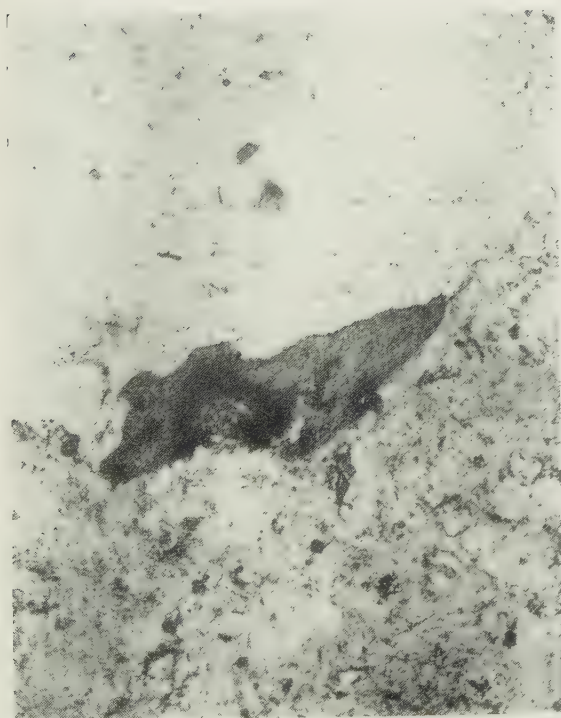
— 2 b. — Autoradiographie de cette biotite montrant une concentration des traces alpha dues au zircon. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours).*



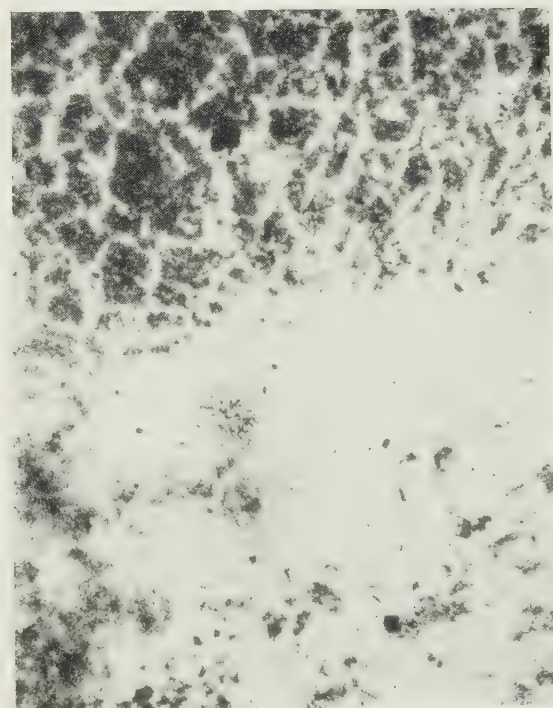
1 a



1 b



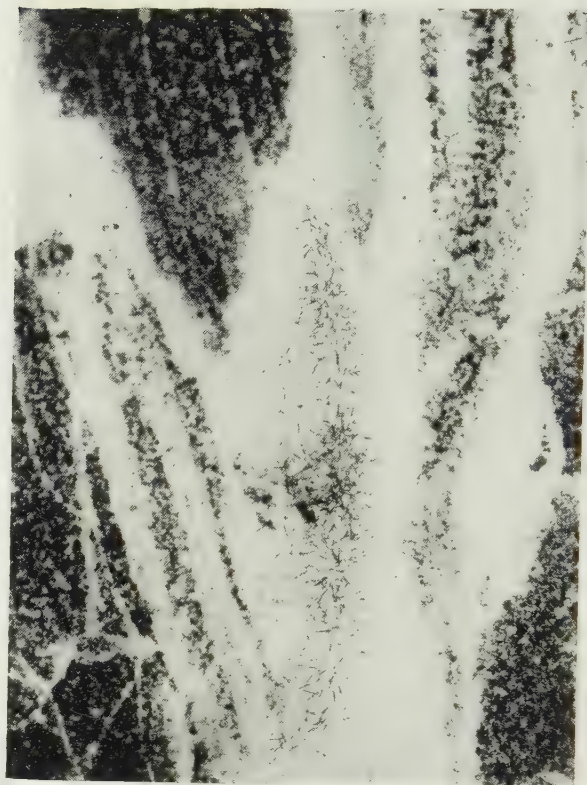
2 a



2 b



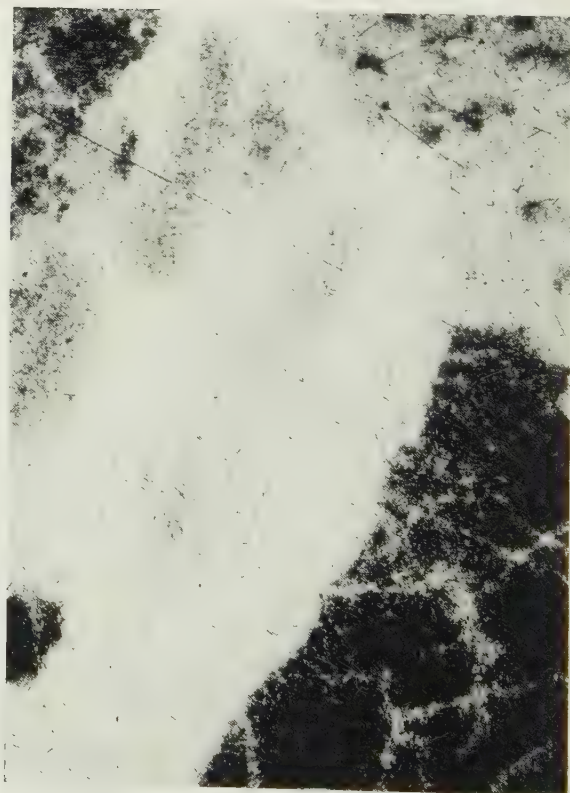
1 a



1 b



2 a



2 b

a — L'échantillonnage. La quantité posée sur la plaque n'est peut-être pas représentative de la roche.

b — La répartition des traces alpha n'est pas toujours très uniforme sur toute la plaque.

c — Le comptage. Quelquefois les traces parasites sont difficiles à distinguer des autres.

d — Les calculs. On admet que le rapport Th/U est constant et il n'en est peut-être pas toujours ainsi.

a — Erreur due à l'échantillonnage.

Pour obtenir des résultats significatifs de la radioactivité d'une roche broyée, il faudrait que cette roche soit tout à fait homogène. Or, ce n'est pas toujours le cas.

En effet, si on considère un granite normal, la radioactivité est concentrée dans les cristaux des minéraux accessoires (zircons, monazites, apatite, etc...). Ces cristaux sont répartis dans la roche de la façon suivante :

- en petites inclusions dans les micas ;
- en petits cristaux inclus dans les feldspaths ou dans le quartz ;
- en petits cristaux dispersés dans les interstices de la roche.

En effet, si les petits cristaux des minéraux accessoires se trouvent dans les micas, il est quelquefois difficile de les extraire tous, par suite de leur petite taille. Dans le cas où les cristaux accessoires se trouvent dans les feldspaths ou dans le quartz, ou dispersés dans toute la roche, nous avons plus de chance de les obtenir tous dispersés dans l'échantillon broyé. On peut considérer que la plupart de ces petits cristaux de minéraux accessoires sont broyés et dispersés dans toute la roche.

D'autre part, dans le cas des granites altérés, la radioactivité est quelquefois concentrée dans les oxydes de fer qui se trouvent dans les fissures de la roche et dans les biotites chloritisées. Dans ce cas, le broyage de l'échantillon à 16 mesh est suffisant pour séparer ces oxydes de fer et les mélanger avec le reste de la roche.

P. Laffitte (1957) a donné l'ordre de grandeur de la dispersion des résultats d'analyse et a établi des règles sur la taille de l'échantillon à analyser. Nous sommes partis d'un volume d'échantillon répondant assez bien aux normes formulées par Laffitte.

PLANCHE XIV

FIG. 1 a. — Biotite altérée avec libération d'oxydes de fer (*Microphotographie L.N. $\times 110$*).

— 1 b. — Autoradiographie de cette biotite montrant la radioactivité des oxydes de fer. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours)*.

FIG. 2 a. — Biotite altérée avec libération d'oxydes de fer. *Microphotographie L.N. $\times 110$* .

— 2 b. — Autoradiographie de cette biotite montrant la radioactivité des oxydes de fer. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours)*.

Nous pouvons donc considérer, qu'après quartage, l'échantillon posé est à peu près homogène, et représente la roche. En partant d'un échantillon plus ou moins homogène, nous étudions, au moyen des plaques nucléaires, une poudre que nous pouvons considérer comme homogène. L'erreur sur la radioactivité globale de la roche n'est donc pas très importante.

Pour diminuer l'erreur due à l'échantillonnage, nous avons récolté à chaque affleurement plusieurs échantillons du même faciès de roche. L'étude de la radioactivité a été faite sur chaque échantillon pris séparément, nous avons pris la moyenne de ces mesures comme représentative de la radioactivité de la roche.

b — Erreur due à l'hétérogénéité de la répartition des traces alpha.

Quelquefois, les traces alpha ne présentent pas une répartition homogène sur la plaque nucléaire. Nous comptons, d'habitude, les traces qui se trouvent dans une surface de 0,25 cm². Dans ce cas, nous aurons des résultats différents si nous comptons plusieurs carrés sur la même plaque. Nous pourrions donc avoir une variation plus ou moins importante du nombre de traces d'une partie à une autre de la plaque nucléaire. A notre avis, pour diminuer cette erreur, il faudrait compter les traces sur une surface plus grande, par exemple 1 cm².

c — Erreur due au comptage.

Une troisième erreur peut venir du comptage des traces alpha. En effet, le problème est de différencier les traces parasites et les traces réelles émanant des minéraux radioactifs de la roche.

Le comptage des traces parasites dues à la radioactivité de l'émulsion et du rayonnement cosmique peut être effectué à l'aide d'une plaque témoin. Nous pouvons considérer que le nombre de traces parasites qui se trouve sur une surface de 0,25 cm² de la plaque nucléaire (surface utilisée pour le comptage des traces alpha) est de 20 à 30 traces. De toutes façons, en augmentant le temps de pose des plaques nucléaires, on peut pallier à cette source d'erreur ; le nombre des traces alpha augmente avec le temps, tandis que celui des traces parasites reste le même et devient négligeable par rapport au précédent. D'autre part, avec une certaine habitude, on parvient facilement à différencier les traces réelles des traces parasites. A notre avis, l'erreur due au comptage est inférieure à 10 %.

d. — Erreur due aux calculs.

Pour déterminer la teneur en uranium, nous avons appliqué la formule établie par R. Coppens (1950) :

$$N = 17,12 \text{ U K'}$$

Dans cette formule, on considère que les familles radioactives sont en équilibre et que le rapport Th/U est égal à 3.

En un mot, la méthode appliquée pour déterminer le rapport Th/U, dans les roches, consiste (R. Coppens, 1948) à mesurer les longueurs d'un certain nombre de traces alpha,

environ 400 à 500 traces et à constituer un histogramme représentant le nombre de traces ayant la même longueur. Les traces atteignant une longueur inférieure ou égale à 38μ sont des traces venant de la famille thorium.

Selon les auteurs, le rapport Th/U peut prendre différentes valeurs pour des roches granitiques.

Senftle et Keevil (1947)...	3,39	Nier (1938)	3,3
Davidson (1957)	5,8 - 2,4 - 3,5 - 6,1	Evans Goodman (1941)	4,5
Holmes (1938)	1,7	Evans Keevil (1942)	4,0
Jeffreys (1936)	2,6	Coppens (1948)	(micaschiste) 5,4 - 2,8
Keevil (1938)	2,8		(granite) 2,8 - 2,75
Holmes (1938)	2,5		(granulite) 3,60

C. Davidson (1957) a trouvé que le rapport Th/U varie entre 1/4 et 21/4. M. Roubault et R. Coppens (1958) ont déterminé le rapport Th/U dans un granite près de Vannes (Morbihan) et ils donnent les résultats suivants : 12,5 pour un granite d'une bande active et 4 pour un granite situé à 50 cm d'une telle bande.

Nous avons pris un rapport Th/U égal à 3, mais il semble que ce ne soit pas toujours le cas. La comparaison entre les résultats donnés par les plaques nucléaires (qui comprennent la teneur en uranium et en thorium), avec les résultats obtenus par la méthode de fluorimétrie (qui détermine uniquement la teneur en uranium) montre que le rapport Th/U est variable et peut quelquefois dépasser 3.

Nous avons calculé le rapport Th/U dans les granites du massif de Vigneux et les granites de la bande Pointe du Raz - Nantes.

Nous avons pris la moyenne de la teneur en uranium, déterminée par la méthode fluorimétrique, de nombreux échantillons. Puis nous avons transformé cette teneur en uranium, en N ($\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$) en utilisant la formule $N_u = 9,20 \text{ U } K'$ ($K' = 15$). Après avoir obtenu N_u qui est égale à 138 U et qui représente le nombre d'alpha par cm^2 par seconde émis uniquement par l'uranium, nous avons soustrait cette valeur N_u de la moyenne de $N_u + N_{\text{Th}}$ obtenue par les plaques nucléaires. A la fin, nous obtenons la valeur N_{Th} qui correspond au nombre d'alpha/ cm^2/s émis par le thorium. En utilisant la formule :

$$N_{\text{Th}} = 2,64 \text{ Th } K' \text{ (} K' = 15 \text{)}$$

nous aurons Th qui est la teneur en thorium. Nous donnerons un exemple : dans la partie est du massif granitique de Vigneux-Orvault, la teneur moyenne de 118 analyses faites par la méthode fluorimétrique est $8,9 \cdot 10^{-6}$.

$$\begin{aligned} N_u &= 9,20 \text{ U } 15 \\ N_u &= 138,12 \cdot 8,9 \cdot 10^{-6} \\ N_u &= 1,35 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}. \end{aligned}$$

La moyenne de $N_u + N_{\text{Th}}$ déterminée par la méthode des plaques nucléaires (sur les mêmes 118 échantillons) est $3,47 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$.

Nous obtenons :

$$N_{\text{Th}} = 3,47 \cdot 10^{-3} - 1,35 \cdot 10^{-3} = 2,12 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$$

Nous avons :

$$N_{\text{Th}} = 2,64 \text{ Th } 15 = 39,6 \text{ Th}$$

En utilisant cette formule, nous aurons :

$$\begin{aligned}\text{Th} &= 53,5 \cdot 10^{-6} \\ \text{Th/U} &= 53,5 : 8,9 = 6,01.\end{aligned}$$

Ce résultat est évidemment approximatif et ne donne qu'une ordre de grandeur.

Par la même méthode, nous avons déterminé le rapport Th/U dans les granites de la partie ouest du massif de Vigneux-Orvault. La moyenne de 22 résultats est :

$$\begin{aligned}\text{Th} &= 57,8 \cdot 10^{-6} & \text{U} &= 9,0 \cdot 10^{-6} \\ \text{Th/U} &= 57,8 : 9,0 = 6,42\end{aligned}$$

Le rapport Th/U a été déterminé dans les granites de la partie centrale du massif de Vigneux et il est égal à 19,8.

On peut conclure que le rapport Th/U est très variable même dans le même faciès des roches.

Enfin, on peut dire que sur la radioactivité globale de l'échantillon, l'erreur due à la méthode des émulsions photographiques est de l'ordre de $\pm 20\%$. Nous pouvons considérer que cette méthode ne donne qu'une valeur approximative, mais elle nous permet de comparer la radioactivité de différentes roches.

AUTORADIOGRAPHIES DES LAMES MINCES

Après avoir obtenu des résultats sur la radioactivité globale des roches, il est intéressant de connaître les minéraux qui confèrent à la roche sa radioactivité.

Une des meilleures méthodes pour localiser les éléments radioactifs dans les roches consiste à combiner la lame mince et la plaque nucléaire. Plusieurs auteurs ont déjà appliqué et discuté cette méthode. C'est M. Cosyns (1947) qui, le premier, a commencé à l'appliquer. Par la suite, A. Héé (1948), E. Piccoto (1949), R. Coppens (1949), et d'autres ont apporté plusieurs modifications.

TECHNIQUE

Cette technique est voisine de celle que nous avons décrite pour l'étude de la radioactivité des poudres. On utilise une plaque Ilford de $50\ \mu$ et la lame mince ne doit pas être recouverte, car le couvre-objet est un écran pour les rayons alpha dont le parcours dans le verre est de l'ordre de quelques dizaines de μ . Toutes deux sont appliquées l'une contre l'autre, la roche en contact de l'émulsion nucléaire sont fortement serrées pour éviter tout déplacement et pour réduire au minimum la couche d'air qui se trouve entre les deux plaques. L'ensemble est placé dans l'obscurité complète pendant un certain temps qui peut varier de quelques jours à deux ou trois mois. Ensuite, la plaque nucléaire est développée en utilisant la même méthode et les mêmes solutions que pour les plaques nucléaires effectuées avec les poudres (pp. 50-52). Après séchage, nous pouvons examiner séparément la plaque mince et la plaque nucléaire, ou nous pouvons examiner les deux ensemble pour repérer les minéraux radioactifs. Si nous superposons les deux

plaques, nous sommes tenu de les remettre dans la position que pendant l'exposition, et obligé d'observer l'émulsion à travers une certaine épaisseur de verre.

Pour bien superposer la plaque nucléaire et la lame mince, il est essentiel de posséder un système de repérage très précis. Afin d'éviter les erreurs de repérage, l'ensemble plaque nucléaire et lame mince est exposé à une source lumineuse ; on obtient ainsi une image, en négatif, de la lame mince sur la surface de la plaque nucléaire. Cette opération est très délicate et demande beaucoup d'attention. L'intensité de la lumière et le temps d'exposition doivent être bien réglés. En effet, si les plaques sont trop exposées, même pour quelques fractions de secondes de trop, elles deviennent sombre au cours du développement et il est à peu près impossible de bien les étudier.

L'étude de l'ensemble de la plaque nucléaire et de la lame mince nous permet donc de localiser avec précision les minéraux radioactifs dans les roches. Nous pouvons déterminer l'élément radioactif et sa teneur. Dans un chapitre précédant, nous avons signalé la différence existant entre la longueur des traces alpha provenant de l'uranium (jusqu'à 38 μ) et celle provenant du thorium (plus de 38 μ). Donc, en mesurant la longueur des traces émises par un certain minéral radioactif, nous pouvons déterminer si nous sommes en présence d'un minéral uranifère ou thorifère. Un seul inconvénient subsiste en utilisant un microscope ordinaire (Nachet) ; nous ne pouvons travailler qu'avec des objectifs de faible grossissement, sinon nous sommes obligés de séparer les deux plaques.

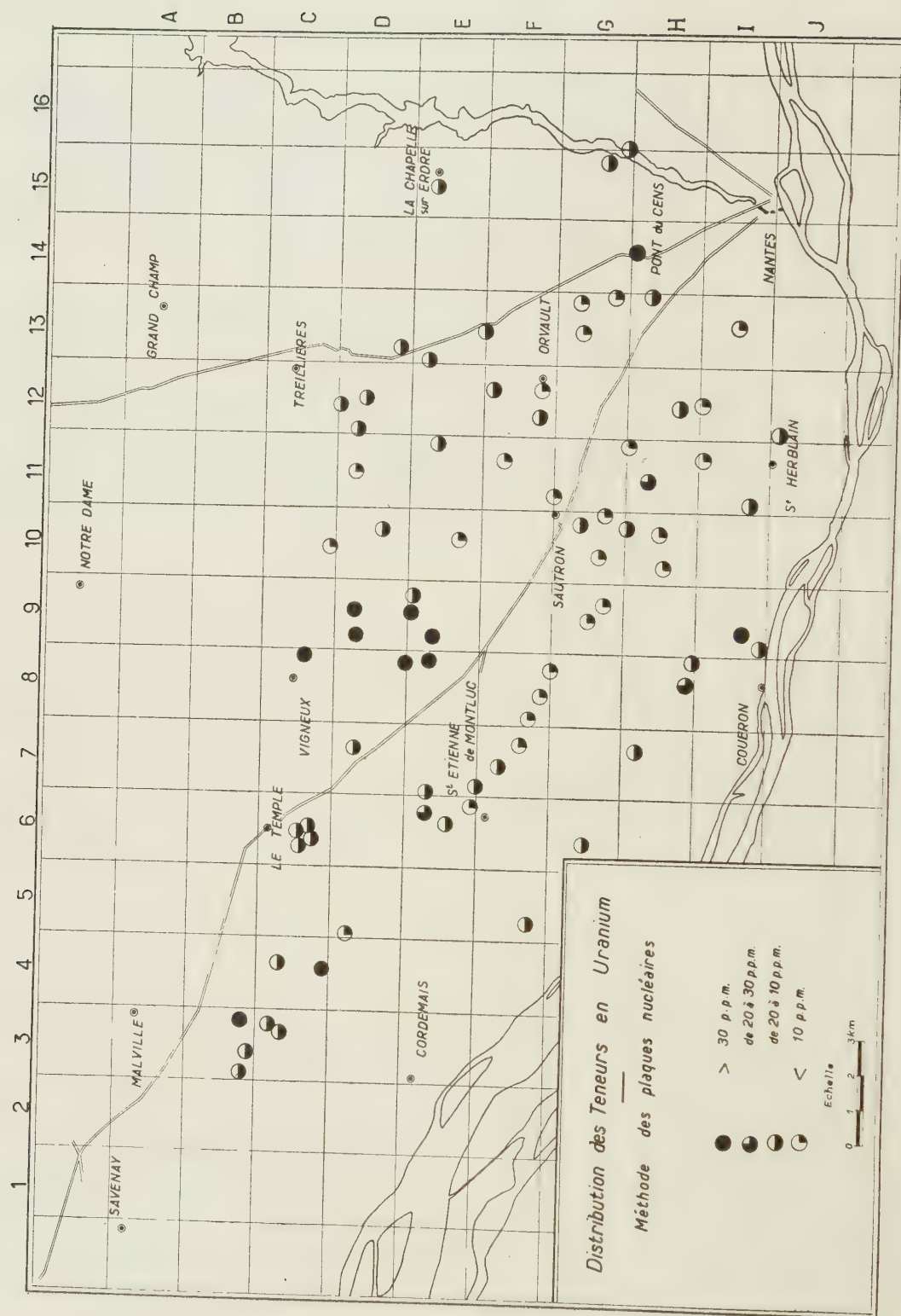


FIG. 5. — Carte représentative de la distribution des teneurs en uranium (méthode des plaques nucléaires).

CHAPITRE III

RADIOACTIVITÉ DES DIFFÉRENTES UNITÉS PÉTROGRAPHIQUES

I. - RADIOACTIVITÉ DU MASSIF GRANITIQUE DE VIGNEUX-ORVAULT

1. — LA PARTIE EST

En général, l'activité de cette partie est assez élevée par rapport à l'activité d'un granite normal. La figure 5 montre une carte de la distribution des teneurs en uranium, déterminées par la méthode des plaques nucléaires, dans toute la région étudiée. La radioactivité moyenne des mesures faites sur 118 échantillons broyés est de l'ordre de $3,47 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à une teneur de $13,5 \cdot 10^{-6}$ d'uranium. On sait bien qu'un granite normal émet en moyenne $1 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à $3,8 \cdot 10^{-6}$ d'uranium. Cependant, nous avons rencontré quelques échantillons assez rares d'ailleurs, ayant une activité de $9,56 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. L'histogramme des répartitions des teneurs en uranium (fig. 6) montre une distribution normale. La radioactivité dans cette partie est du massif de Vigneux est variable. Certains points particuliers ont attiré notre attention.

L'ACTIVITÉ DU GRANITE DES ENVIRONS D'ORVAULT

A Orvault, la Bussonnière, la Goullière, les Epinettes, la Primaudière, le Prusot et la Bouvardière, la radioactivité est assez faible par rapport au reste du granite de la partie est du massif de Vigneux. Cette activité ne dépasse pas $2,65 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$ (ou une teneur de 10^{-6} d'uranium). En général, le granite de ces affleurements n'est pas très altéré et contient quelques petits cristaux de zircon entourés de halos pléochroïques dans la biotite (Pl. XIII, fig. 2 a et 2 b).

Les mesures faites au compteur Geiger nous ont révélé une activité normale qui ne dépasse pas 40 chocs/s A. V. P. C'est uniquement à la Primaudière que l'activité atteint 60 chocs/s, tandis que la radioactivité déterminée par les plaques nucléaires ne dépasse pas $2,14 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$.

On sait que, dans certain cas, une grande partie de la radioactivité des roches est due à la présence de radon, qui se mesure facilement avec le compteur. Tandis que, par la

méthode des émulsions nucléaires, la plupart du radon est perdu pendant l'opération de broyage des échantillons, ce qui explique la différence entre les résultats obtenus.

D'autre part, les formules utilisées pour l'évaluation des teneurs en uranium à partir des plaques nucléaires sont calculées en admettant l'équilibre radioactif.

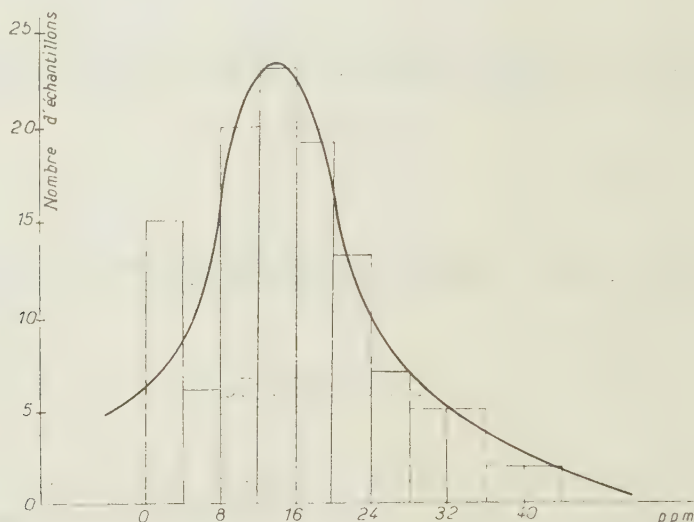


FIG. 6. — Histogramme montrant la répartition des teneurs en uranium déterminées par la méthode des plaques nucléaires dans le granite de la partie est du massif de Vigneux.

L'étude de l'autoradiographie des lames minces taillées dans quelques granites de ces affleurements, nous a conduit à des résultats assez intéressants.

Dans le granite et la pegmatite à tourmaline d'Orvault, nous avons remarqué que la radioactivité est localisée dans trois complexes fondamentaux :

a) Quelques petits cristaux de zircon au centre des halos pléochroïques de la biotite et quelquefois aussi logés dans les cristaux de feldspaths sont radioactifs.

PLANCHE XV

Fig. 1 a. — Tourmaline contenant des petites inclusions. *Microphotographie L. N. × 110.*

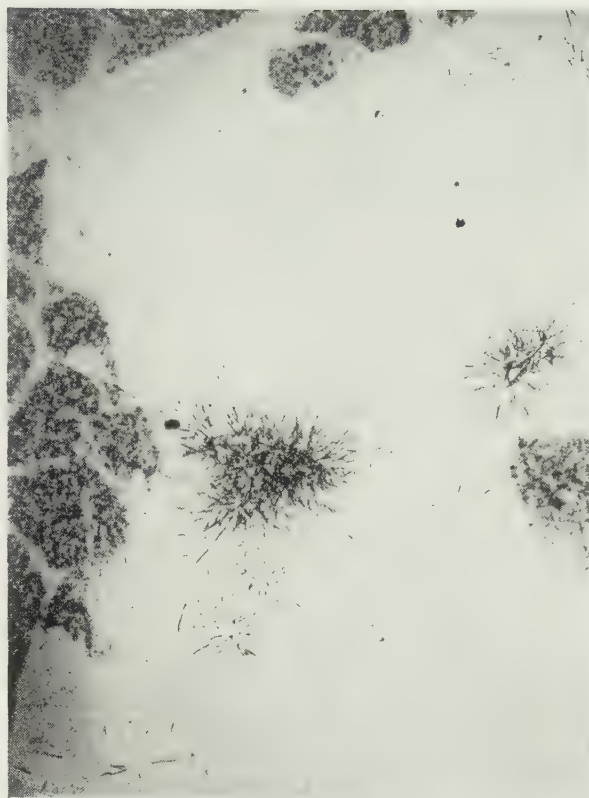
— 1 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité des inclusions dans la tourmaline. *Microphotographie × 110. (Temps de pose : 60 jours).*

Fig. 2 a. — Biotite altérée avec libération d'oxydes de fer. *Microphotographie L. N. × 110.*

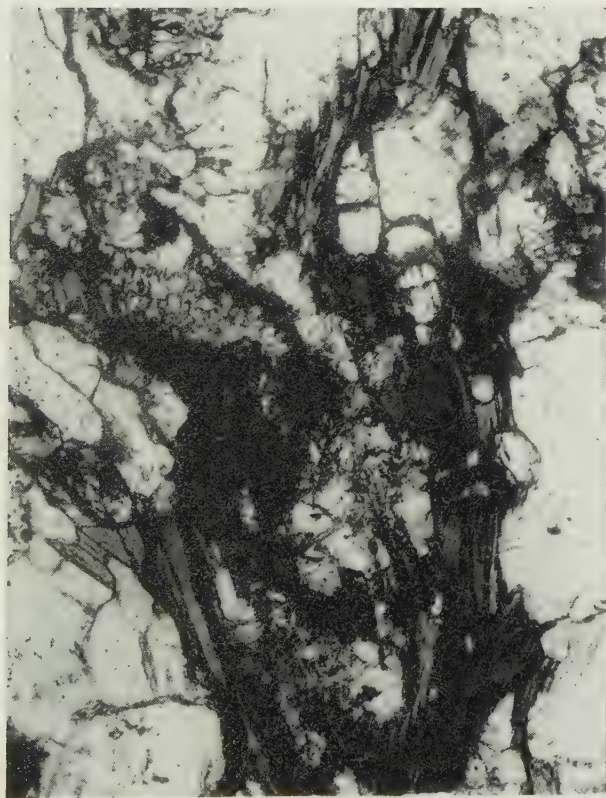
— 2 b. — Autoradiographie de la biotite montrant la concentration de traces alpha due aux oxydes de fer. *Microphotographie × 110. (Temps de pose : 60 jours).*



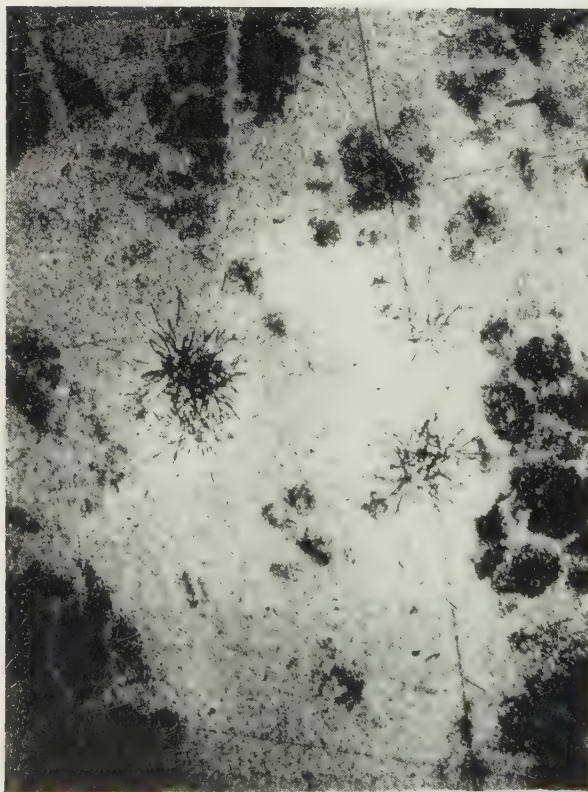
1 a



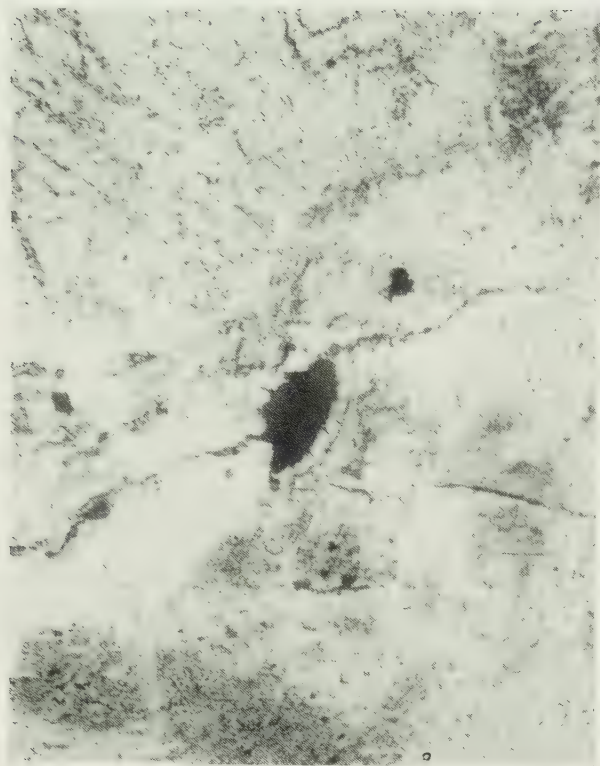
1 b



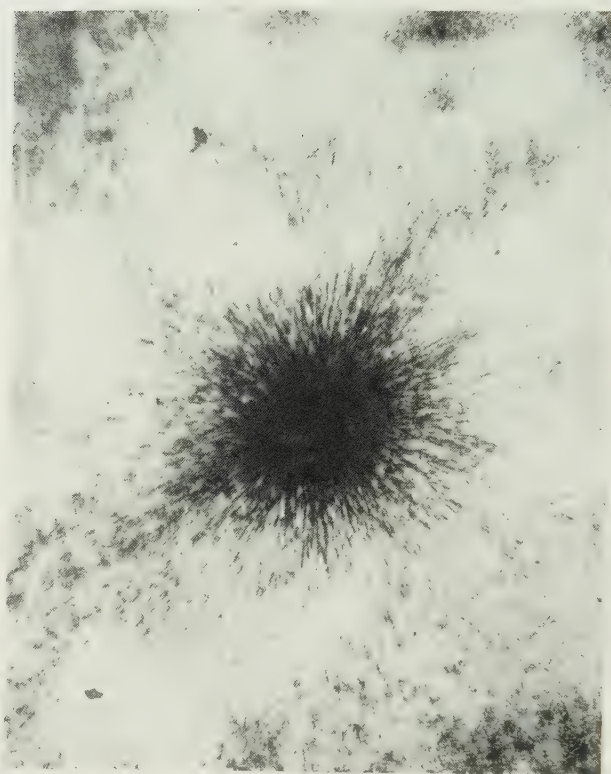
2 a



2 b



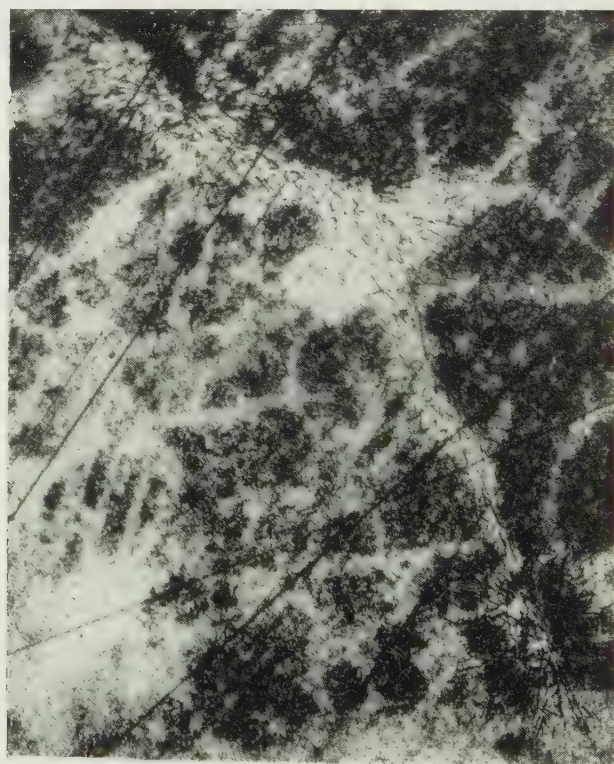
1 a



1 b



2 a



2 b

H. HUSSEIN. — *Etude pétrographique et radiogéologique de la région située au Nord de Nantes (Loire-Atlantique)*

b) Les oxydes de fer, dus à l'altération de la biotite et qui se trouvent surtout concentrés dans les fissures des minéraux, sont un peu radioactifs (Pl. XIII, fig. 1 a et 1 b). En particulier, des cristaux d'almandin, qui contiennent des craquelures remplies par des produits jaunes d'altération, sont radioactifs. Il faut noter, cependant, que la radioactivité de ces oxydes de fer n'est pas très remarquable. Sur la plaque nucléaire, on rencontre seulement quelques traces alpha disséminées irrégulièrement et qui dessinent le tracé des fissures remplies d'oxydes de fer.

c) Enfin, nous notons la tourmaline, dont la radioactivité est assez importante. Nous avons déjà parlé de la présence, dans les grands cristaux de tourmaline, de petites zones de couleur foncée et au centre desquelles se trouvent de petites inclusions d'un minéral qui est très vraisemblablement du zircon. En effet, la taille de ces cristaux est si petite qu'elle ne nous a pas permis une détermination microscopique sûre.

Sur la plaque nucléaire, nous avons pu observer la présence de traces alpha superposables avec ces petits cristaux (Pl. XV, fig. 1 a et 1 b). Il est intéressant de signaler que les cristaux de tourmaline eux-mêmes ne sont pas radioactifs, comme dans le cas de la biotite, mais que la radioactivité est due uniquement à la présence de petites conclusions dans les cristaux et dans les fissures.

Dans le granite brun des Epinettes, on rencontre quelques petites inclusions de zircon dans les cristaux de quartz.

L'étude de l'autoradiographie des plaques minces du granite de la Primaudière montre de petites inclusions dues à la présence d'apatite. De plus, le zircon entouré des halos pléochroïques dans la biotite ainsi que les oxydes de fer dûs à l'altération sont radioactifs. La biotite est très souvent altérée en chlorite et, dans ce cas là, seule la chlorite est radioactive, la biotite elle-même ne l'étant pas.

La chlorite contient des petites inclusions de zircon et des oxydes de fer qui sont radioactifs. Il semblerait que, pendant l'altération de la roche, l'uranium, qui était concentré dans les cristaux de minéraux accessoires (zircon, apatite...), ait été libéré et qu'il se soit concentré dans les oxydes de fer et mélangé avec la chlorite même.

Il est à signaler que les oxydes de fer sont dispersés dans toute la roche, mais tout particulièrement dans les plans de clivage des feldspaths et de la chlorite.

RADIOACTIVITE ANORMALE DU GRANITE BRUN DU BRULIS

Dans la carrière du Brulis (affleurement n° 55 D 13), la radioactivité est assez élevée par rapport à l'ensemble du granite de la partie est du massif de Vigneux. Les

PLANCHE XVI

FIG. 1 a. — Autunite dans les fissures des feldspaths. *Microphotographie L.N. × 110.*

— 1 b. — Autoradiographie de l'autunite. *Microphotographie × 110. (Temps de pose : 3 jours).*

FIG. 2 a. — Oxydes de fer dans les fissures du granite. *Microphotographie L.N. × 110.*

— 2 b. — Autoradiographie montrant la localisation de la radioactivité dans les fissures remplies d'oxydes de fer. *Microphotographie × 110. (Temps de pose : 30 jours).*

mesures faites au compteur montrent une activité (46 - 55 chocs/s A. V. P.) pour le granite de cette carrière. Avec la méthode des plaques nucléaires, les résultats obtenus varient de $1,00 \cdot 10^{-3}$ à $9,56 \cdot 10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$.

Après une première étude d'ensemble, il nous est apparu que, les échantillons, dont l'activité est la plus élevée, sont des granites bruns porphyroïdes très riches en biotite et contenant un très grand nombre de petits cristaux de zircon. Ces granites sont altérés et contiennent des quantités variables d'oxydes de fer. Au contraire, les échantillons, dont la radioactivité est très faible, sont des granites gris, pauvres en biotite et peu altérés. Il semblerait donc que la radioactivité soit liée à la présence des micas contenant des minéraux accessoires et à l'altération de la roche. Une étude plus détaillée nous a conduit à des conclusions similaires.

Les autoradiographies de lames minces de plusieurs granites de cet endroit, le Brulis, nous montrent un certain nombre de petites inclusions. En général, ces inclusions sont dues aux petits cristaux de zircon et d'apatite qui sont très abondants. Les micas sont en général très altérés et les roches contiennent des oxydes de fer dans les fissures et entre le clivage des cristaux. Ces oxydes de fer sont radioactifs et se trouvent surtout concentrés dans la biotite (Pl. XIV, fig. 1 a et 1 b) et la muscovite, ainsi que dans les feldspaths altérés en séricite.

L'étude systématique de l'autoradiographie de plaque mince d'un granite brun altéré nous a montré 31 inclusions distribuées comme ci-dessous :

16 inclusions dans la biotite,	
6 " " la muscovite,	
4 " " les feldspaths,	
3 " " l'apatite,	
2 " " les fissures.	

Une autre autoradiographie, d'un granite très riche en biotite et en oxydes de fer, contient 77 petites inclusions réparties de la façon suivante :

25 inclusions dans la biotite,	
12 " " la muscovite,	
11 " " les feldspaths,	
15 " " le quartz,	
6 " " les fissures,	
2 " " le rutile,	
6 " " l'apatite.	

Les inclusions rencontrées dans les feldspaths et dans le quartz sont en général dues aux oxydes de fer provenant de l'altération des minéraux, sauf quelques-unes qui sont dues à de petits cristaux de zircon.

De cette étude, il semblerait donc que la radioactivité de la plupart des granites soit due aux petits cristaux des minéraux accessoires (zircon, apatite et rutile) qui se trouvent eux-mêmes concentrés dans les micas et aux oxydes de fer dûs à l'altération.

Des observations identiques aux précédentes ont été faites à la Guichardière, à Garambeau et à la Bernardais. Dans ces trois affleurements, le granite altéré et riche en biotite était plus radioactif que le granite gris altéré.

RELATION ENTRE L'ALTERATION ET LA PRESENCE D'AUTUNITE

Dans la carrière de la Grée à Orvault, C. Baret (1898) a signalé la présence d'autunite dans la pegmatite à tourmaline, mais nous n'avons pas pu la mettre en évidence malgré une recherche minutieuse. En effet, il s'agirait de petites paillettes isolées fixées sur des cristaux de feldspaths. Par contre, en étudiant le granite et la pegmatite à tourmaline des Perrières et du Verdet (affleurements n° 34 F12 et n° 44 E11) à côté d'Orvault, nous avons pu mettre en évidence la présence d'une minéralisation uranifère. L'étude des plaques nucléaires faite sur les échantillons broyés et récoltés dans ces deux endroits, montre une radioactivité anormale qui peut atteindre jusqu'à $4,38.10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. Mais cette radioactivité semble être indépendante de la présence d'autunite, car nous n'avons pas trouvé de très fortes inclusions sur les plaques nucléaires étudiées. En étudiant les autoradiographies de plaques minces, nous avons remarqué par hasard, la présence de très fortes inclusions dans les cristaux de feldspaths.

Les mesures de longueurs de traces alpha nous ont permis d'affirmer qu'il s'agissait d'un minéral d'uranium. La teneur en uranium de ce minéral est voisine de 50 %. Nous avons étudié avec soin les échantillons récoltés sur ces deux affleurements à l'aide de la lampe à rayons ultraviolets, et nous avons pu noter la présence de quelques petites paillettes d'un minéral fluorescent en vert. Ce minéral, qui n'est pas visible à l'œil nu, est très vraisemblablement de l'autunite.

La teneur en uranium de ce granite, déterminée par la méthode des plaques nucléaires, est beaucoup plus élevée que celle obtenue par la méthode fluorimétrique. R. Coppens (1958) explique cette variation par un déséquilibre entre l'uranium et ses descendants. Ce fait nous permet de donner une origine récente à la présence d'autunite dans le granite du Maroc.

LE ROLE DES OXYDES DE FER

Les granites altérés contiennent des oxydes de fer radioactifs. L'étude autoradiographique des lames minces a montré que les oxydes de fer, qui se trouvent dans le granite à autunite du Maroc (Pl. XVI, fig. 2a et 2b), sont beaucoup plus radioactifs que ceux des autres granites. Ce fait laisserait supposer qu'il existe une relation entre la formation de l'autunite et l'altération.

La présence d'autunite sous forme de placages séparés et fixés sur les cristaux de feldspaths, ainsi que la radioactivité anormale des oxydes de fer dans les fissures et dans les plans de clivages des feldspaths, sont une preuve en faveur de cette hypothèse.

Mais d'où viendrait l'uranium ?

M. Roubault et R. Coppens (1958) ont abordé ce problème en étudiant le granite du batholite de Mortagne-sur-Sèvre (Vendée). Ce granite contient de l'autunite qui ressemble à celle que nous avons rencontrée aux Perrières et au Verdet. Les auteurs expliquent la présence de cette autunite par « un enrichissement préalable en uranium dans les granites, enrichissement suivi, dans certains cas, d'une minéralisation ultérieure en autunite... ». Il semble donc que les déplacements de l'uranium soient corrélatifs à l'altération des granites, ce qui implique au moins partiellement l'action de l'eau servant ainsi de véhicule à l'élément sous la forme U^{6+} . Le processus de ces déplacements pourrait être schématisé, ainsi qu'il suit :

1) Oxydation des biotites et autres minéraux ferrugineux. Apparition du fer sous la forme Fe^{+++} .

2) Oxydation et destruction de certaines inclusions radioactives avec libération de l'uranium.

3) Précipitation de l' U^{6+} en U^{4+} par le fer Fe^{++} et absorption de cet uranium par les oxydes de fer qui se forment en l'absence d'ions sulfure.

4) L'uranium resterait provisoirement dans les minéraux altérés ou s'échapperait par les fissures.

5) Le phosphore pourrait provenir de la destruction des phosphates (apatite, xéno-line, monazite...) et transformerait parfois le dépôt d'uranium en autunite.

6) Lorsque la teneur du granite est forte et dépasse par exemple $10 \cdot 10^{-6}$, le supplément pourrait être le résultat d'un enrichissement rendu possible par le processus proposé.

Cette hypothèse de la formation d'autunite semble logique, mais nous ne pouvons pas l'admettre entièrement. Dans plusieurs cas, nous avons rencontré de la biotite altérée en chlorite avec libération des oxydes de fer radioactifs, mais les petites inclusions de zircon et d'apatite ou d'autres minéraux existaient toujours dans la biotite altérée. En réalité, ces petits cristaux ont perdu une partie seulement de leur radioactivité pendant le processus d'altération. La radioactivité, ainsi perdue, semble s'être concentrée dans les oxydes de fer de la chlorite et dans les feldspaths. Donc, la radioactivité globale du granite reste plus ou moins constante. La preuve en est que l'étude des plaques nucléaires des échantillons broyés des granites à autunite montre une radioactivité élevée et anormale. Cette radioactivité semble être indépendante de la présence de l'autunite. En effet, comme nous l'avons fait remarquer un peu plus haut, nous n'avons pas rencontré des inclusions à forte teneur sur les plaques étudiées. C'est-à-dire que le granite lui-même n'a pas perdu sa radioactivité au profit de la formation de l'autunite.

Même si nous admettons une libération complète de l'uranium qui se trouve dans les minéraux accessoires, au cours de l'altération, la quantité d'uranium n'est pas assez importante pour permettre la formation de l'autunite.

PLANCHE XVII

Fig. 1 a. — Autunite fixée sur du quartz. *Microphotographie L.N. $\times 440$.*

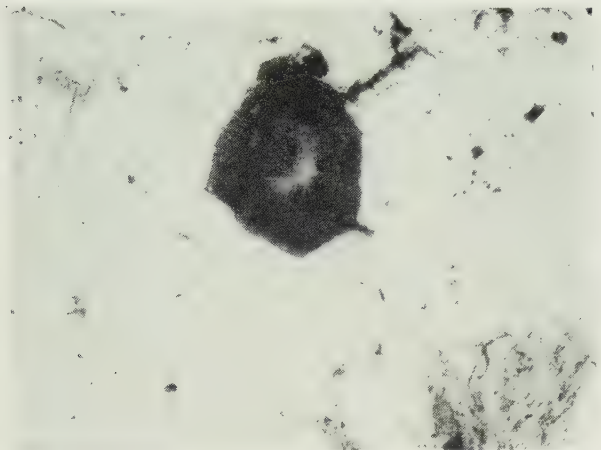
— 1 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de cette autunite. *Microphotographie L.N. $\times 440$. (Temps de pose : 3 jours).*

Fig. 2 a. — Autunite en placage sur les cristaux de feldspaths. *Microphotographie L.N. $\times 440$.*

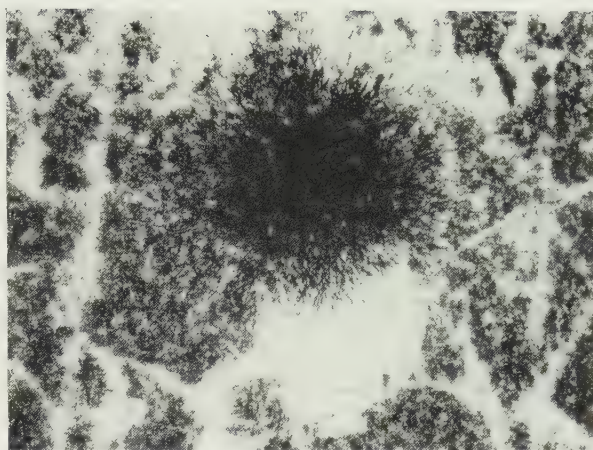
— 2 b. — Autoradiographie montrant le rayonnement alpha dû à l'autunite. *Microphotographie $\times 440$. (Temps de pose : 3 jours).*

Fig. 3 a. — Autunite fixée sur les feldspaths altérés. *Microphotographie L.N. $\times 440$.*

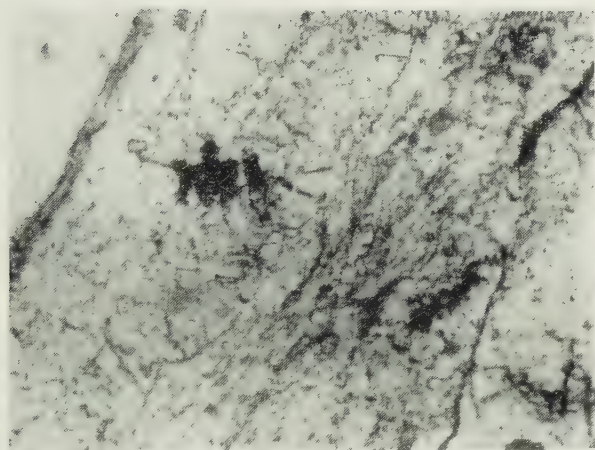
— 3 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de l'autunite. *Microphotographie $\times 440$. (Temps de pose : 3 jours).*



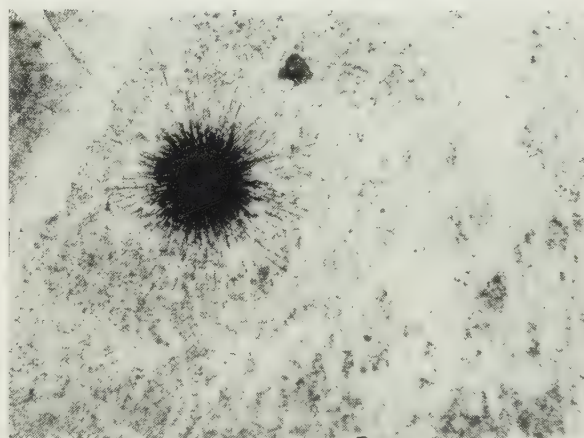
1 a



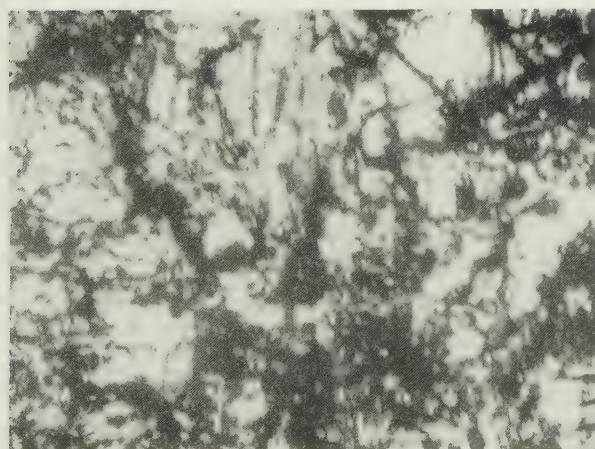
1 b



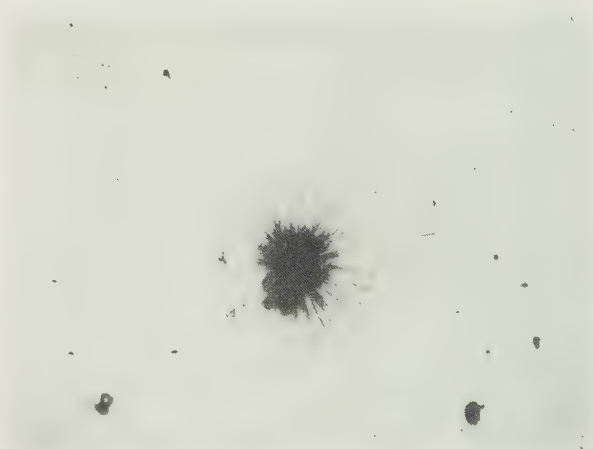
2 a



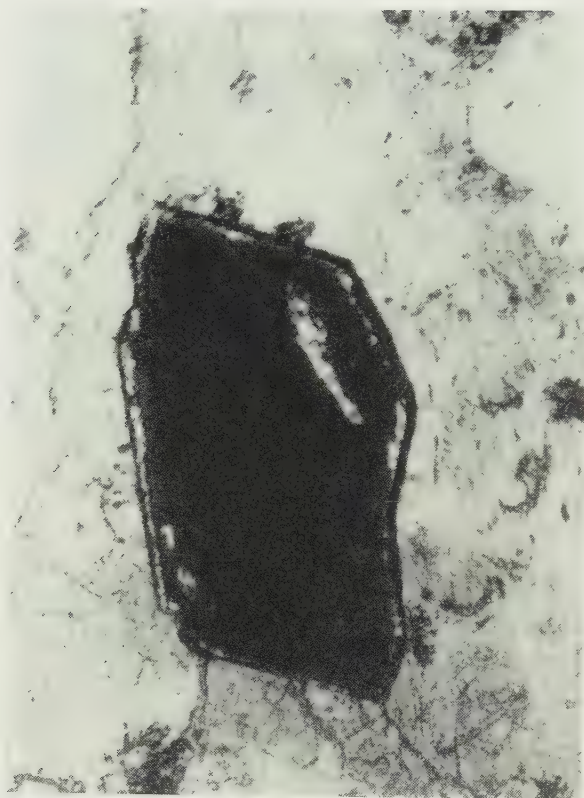
2 b



3 a



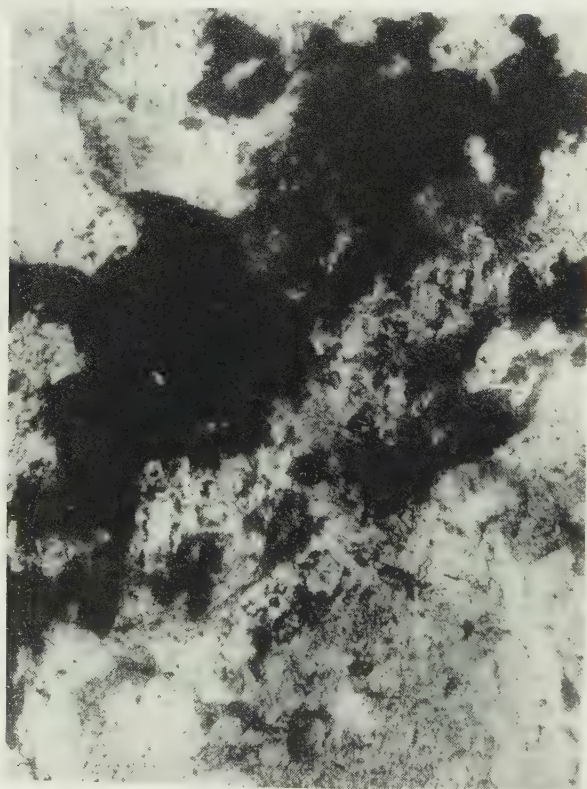
1



1 a



1 b



2 a



2 b

En effet, on rencontre quelquefois des placages d'autunite dans les fissures de la roche. Cette quantité est variable, mais il semble difficile d'admettre que la formation de l'autunite soit due uniquement à la libération de l'uranium qui existait dans les petits cristaux de minéraux accessoires avant l'altération.

2. — LA PARTIE CENTRALE

La partie centrale du massif de Vigneux-Orvault, qui se situe aux environs de Vigneux, est caractérisée par l'abondance de granite brun à gros grain, altéré et riche en biotite.

La radioactivité de cette région est anormale et supérieure à celle des autres granites trouvés dans toute la région étudiée. La moyenne de 93 mesures effectuées avec les plaques nucléaires sur les échantillons broyés et récoltés dans cette partie est égale à $6,20 \cdot 10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à une teneur de l'ordre de $24,1 \cdot 10^{-6}$ d'uranium.

MINÉRALISATION URANIFÈRE DANS LES CARRIÈRES DU MARROC ET DE LA FAVERIE

C'est dans les deux carrières du Maroc (affleurement n° 48 E 9) et de la Faverie du Buron (affleurement n° 46 E 9) que nous avons signalé (Coppens et Hussein, 1957) la présence d'une minéralisation uranifère localisée principalement au contact du granite gris à grain moyen et du granite à gros grain. Cette minéralisation, que nous avons repérée par sa fluorescence verte aux rayons ultraviolets, se présentait sous forme de placages. Ce minéral se trouve en petites quantités dans les fissures de la roche (Pl. XVI, fig. 1 a et 1 b), fixé sur les cristaux de quartz et de feldspaths. Nous avons pu séparer les petites paillettes de ce minéral et les poser sur une plaque nucléaire. Nous avons obtenu de très fortes inclusions, dont l'étude nous a permis de déterminer ce minéral qui semble être une variété d'autunite et qui renferme 50 % d'uranium. D'autre part, l'étude des plaques nucléaires des poudres des 42 échantillons, récoltés dans la carrière du Maroc, a montré une radioactivité très élevée, qui varie entre 2,24 et $9,68 \cdot 10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$.

Les deux échantillons (605 H et 608 H), qui correspondent à deux remplissages d'argile

PLANCHE XVIII

Fig. 1 a. — Pyrite entourée par une bordure d'un minéral difficile à déterminer. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

— 1 b. — Autoradiographie de cette pyrite montrant la radioactivité concentrée dans le minéral qui entoure la pyrite. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 30 jours).*

Fig. 2 a. — Pyrite contenant des petites inclusions. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

— 2 b. — Autoradiographie montrant que le rayonnement alpha est dû aux petites inclusions dans cette pyrite. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 30 jours).*

dans la carrière du Maroc, ont une radioactivité très élevée ($10,30.10^{-3}$ et $15,10.10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$). Si nous supposons que cette argile ne renferme que de l'uranium et ses dérivés, ces valeurs correspondent à une teneur de $74,5.10^{-6}$ et $109,3.10^{-6}$ d'uranium. Cette argile, qui remplit les fissures, se trouve en contact avec le granite à autunite et a une puissance d'environ 25 cm. Elle ne contient aucune minéralisation uranifère, malgré sa radioactivité très élevée.

Au compteur, elle affiche une activité plus élevée que le reste du granite, de l'ordre de 60 chocs/s A. V. P., tandis que pour le granite à autunite, l'activité n'est que de l'ordre de 50 chocs/s A. V. P. Il semble que ces deux remplissages d'argile soient secondaires. Une étude sur le terrain et l'examen pétrographique des lames minces ont montré que la roche était orientée et écrasée sous l'influence de forces tectoniques qui avaient en même temps provoqué une fracture dans le granite. Cette cassure, ainsi formée, serait remplie progressivement de produits d'altération et de lessivage provenant certainement du granite en contact. L'agent de transport de ces produits est l'eau de pluie acide, qui, après avoir lessivé une partie de l'uranium existant sous forme d'autunite dans le granite, l'a véhiculé jusqu'aux fractures où il s'est absorbé. Pour cette raison, nous ne trouvons aucune minéralisation dans les argiles en question.

L'étude de la répartition de la radioactivité par autoradiographie de lames minces des échantillons récoltés dans les carrières du Maroc et de la Faverie montre que l'uranium de ces granites se trouve réparti de plusieurs façons :

- 1) Sous forme d'autunite présente en petites lamelles fixées sur les cristaux de microline (Pl. XVII, fig. 2 a et 2 b), et quelquefois sur le quartz (Pl. XVII, fig. 4 a et 4 b).
- 2) Dans les oxydes de fer, remplissant les fissures entre les cristaux. Leur radioactivité est assez élevée par rapport à celle des oxydes de fer rencontrés dans les granites normaux altérés.
- 3) Dans les cristaux de zircon en inclusions dans la biotite altérée en chlorite. Le zircon semble être pauvre en uranium, tandis que la chlorite est radioactive et contient de petites inclusions d'oxydes de fer radioactives.
- 4) Dans quelques petits cristaux d'apatite.

On note ici que la plupart de l'uranium se trouve dans les fissures et les minéraux altérés. L'uranium semble être d'origine secondaire. La radioactivité dans les granites du Maroc est très élevée et indépendante de la présence d'autunite. Comme nous l'avons dit précédemment, si nous considérons que l'autunite provient uniquement de la libération de l'uranium existant dans les cristaux accessoires (zircon, apatite, etc...), nous ne pouvons pas expliquer cette radioactivité anormale. Il semble logique qu'une partie de l'uranium de ces petites inclusions ait été libérée, puis lessivée par l'eau acide, oxydée en U^{6+} à l'aide des oxydes de fer qui sont réduits en Fe^{2+} .

Mais en plus de cet uranium secondaire, vient s'ajouter l'uranium transporté par des agents hydrothermaux ; les deux réunis peuvent former de l'autunite. Mais, s'il n'y a pas d'uranium transporté, l'altération libère une partie de l'uranium présent dans les minéraux accessoires, mais cet uranium ne serait pas suffisant pour former l'autunite. Il va précipiter avec les oxydes de fer et finalement la radioactivité de la roche sera assez élevée sans que nous ayons formation d'un minéral uranifère.

Les affleurements de la Babinière, de la Roche, de Malescot et de Vigneux illustrent

cette hypothèse. En effet, nous sommes en présence d'un granite brun à gros grain riche en biotite altéré et broyé, dont la radioactivité est très élevée et peut atteindre jusqu'à $11,82 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. Il renferme une teneur d'environ $46 \cdot 10^{-6}$ d'uranium et cette teneur est supérieure à celle que renferme les granites à autunite du Maroc. L'uranium se trouve surtout concentré dans les oxydes de fer.

3. — LA PARTIE OUEST

La radioactivité du granite de la partie ouest du massif de Vigneux-Orvault est moins élevée que celle de la partie centrale. Les résultats des 22 mesures faites sur les différents échantillons récoltés montrent une radioactivité moyenne de l'ordre de $3,53 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à une teneur de $13,7 \cdot 10^{-6}$ d'uranium. Cette radioactivité est très voisine de celle de la partie est du massif ($3,47 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$).

Nous remarquons que les échantillons, dont la radioactivité est la plus élevée, sont des granites où l'orientation des grains est nette.

L'étude d'autoradiographie des lames minces a montré que l'uranium se localise également dans les petites inclusions de zircon et principalement dans les oxydes de fer, dans les fissures et dans les biotites chloritisées.

CONCLUSION

1) La radioactivité dans le massif de Vigneux-Orvault est très variable. Elle est très élevée dans la partie centrale du massif constituée de granite très altéré, tandis que les parties est et ouest sont peu radioactives.

2) Les oxydes de fer et les petites inclusions de minéraux accessoires (zircon, apatite, etc...) sont particulièrement radioactifs.

3) L'autunite se trouve en petites quantités sous forme de placages sur les cristaux de feldspaths et quelquefois sur le quartz, aux quatre affleurements du Maroc, de la Faverie, du Verdet et des Perrières.

II. - RADIOACTIVITÉ DE LA BANDE DE GRANITE AU NW DE NANTES

Dans l'ensemble, cette bande granitique, qui correspond à la partie sud de la bande Pointe du Raz - Nantes, est formée d'un granite plus ou moins orienté et à deux micas, où la muscovite est, en général, plus abondante que la biotite.

La radioactivité de cette bande granitique est moins élevée que celle du granite du massif de Vigneux. La moyenne de la radioactivité, mesurée par la méthode des

plaques nucléaires sur 134 échantillons prélevés dans ce massif, est de l'ordre de $1.02 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. Cette teneur est très voisine de la radioactivité d'un granite normal ($1 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$).

L'histogramme de répartition des teneurs en uranium (fig. 7) fait apparaître une distribution normale.

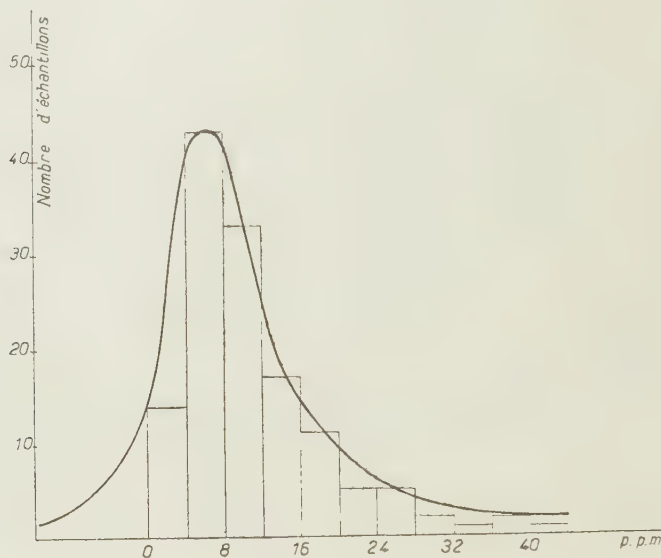


FIG. 7. — Histogramme montrant la répartition des teneurs en uranium déterminées par la méthode des plaques nucléaires dans le granite du NW de Nantes.

L'étude pétrographique de cette bande granitique nous montre différentes variétés de granites dont l'altération est très variable. Dans la partie sud, près de Nantes, nous rencontrons un faciès de granite très homogène à deux micas et peu altéré. En s'éloignant de Nantes vers Savenay, le granite a tendance à s'orienter de plus en plus, à s'altérer et à s'enrichir en muscovite.

PLANCHE XIX

FIG. 1 a. — Pyrite dans les fissures des feldspaths. *Microphotographie L. N. X 440*.

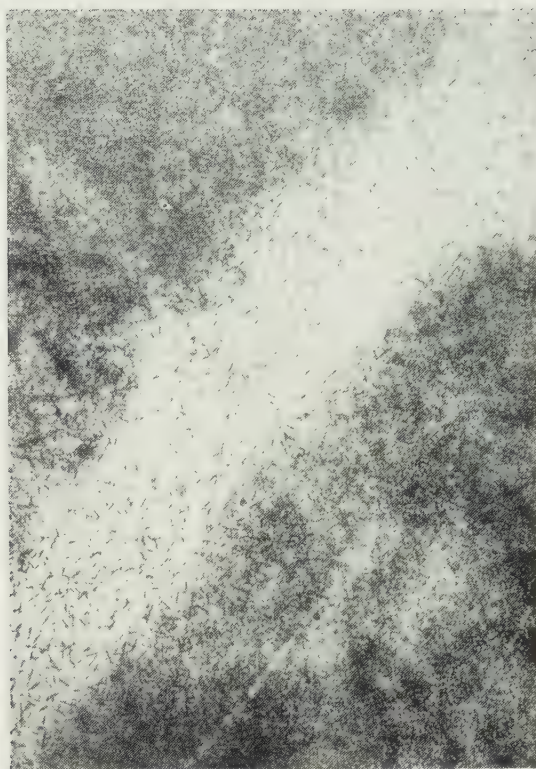
— 1 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de cette pyrite. *Microphotographie X 440*. (Temps de pose : 30 jours).

FIG. 2 a. — Pyrite (p) et des oxydes de fer (o) dans un granite gneissique. *Microphotographie L. N. X 440*.

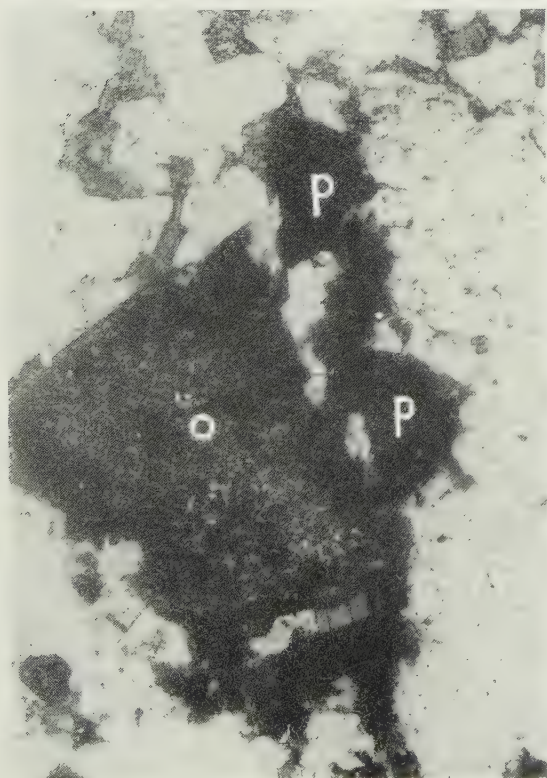
— 2 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de cette pyrite et celle des oxydes de fer. *Microphotographie X 440*. (Temps de pose : 30 jours).



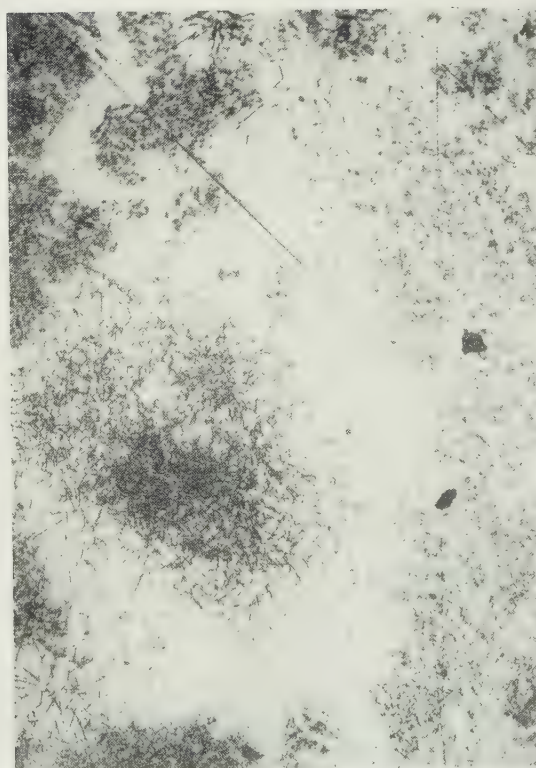
1 a



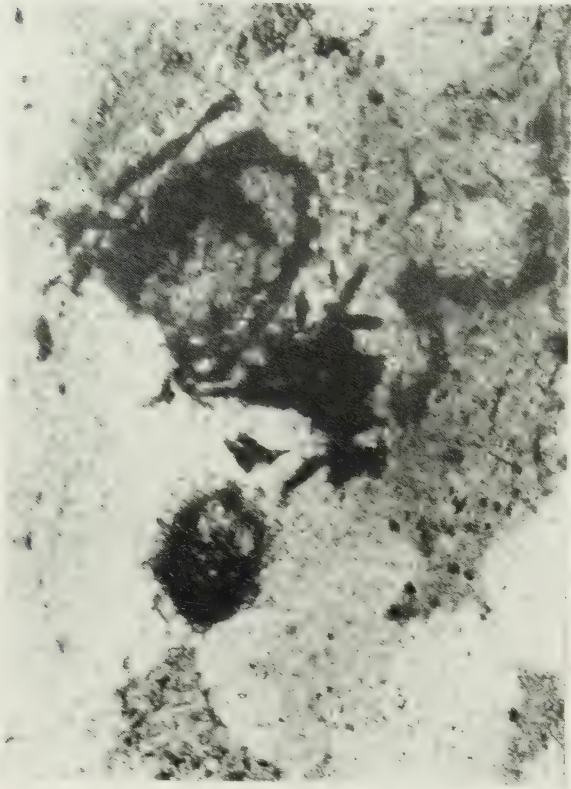
1 b



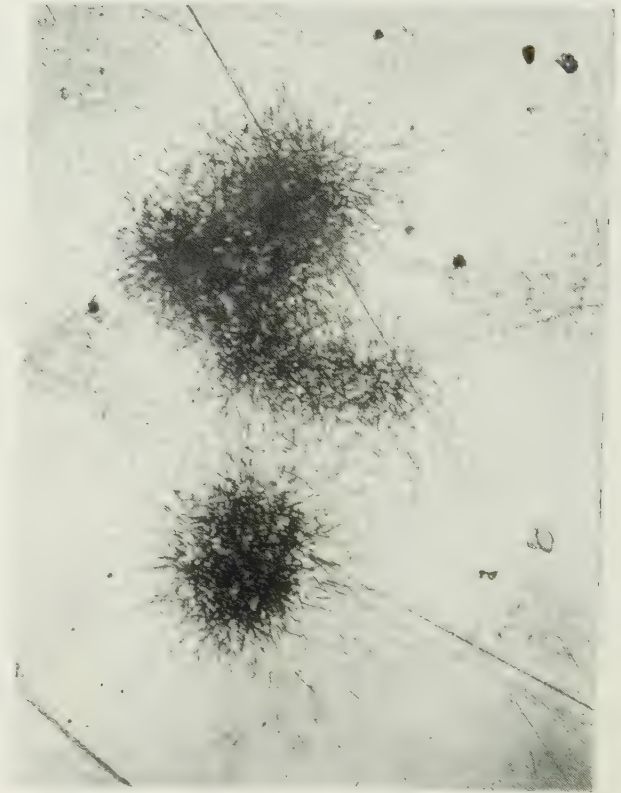
2 a



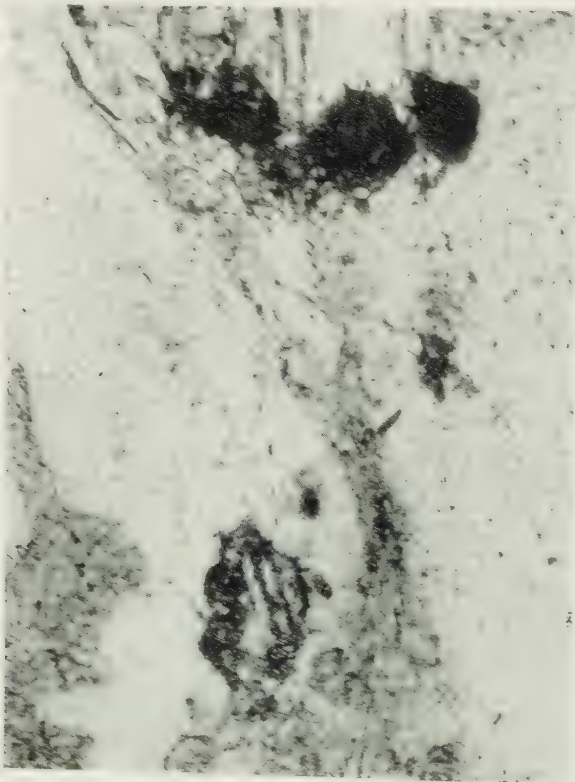
2 b



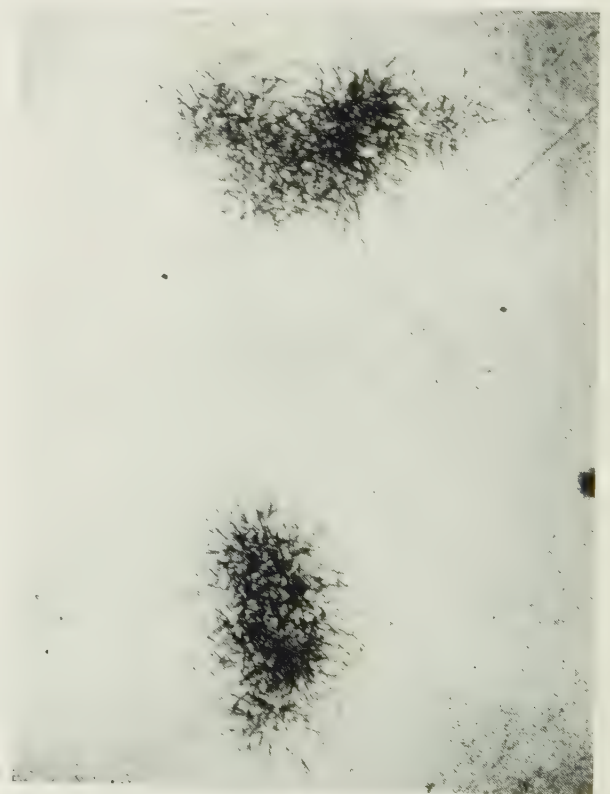
1 a



1 b



2 a



2 b

En examinant les résultats des mesures effectuées avec les plaques nucléaires sur les poudres des échantillons récoltés (voir annexe), nous pouvons faire différentes remarques.

L'ACTIVITE DU GRANITE GRIS

Le granite gris, qui affleure au Sud du massif, à la Contrie ou à la Rivaudière, a une radioactivité normale, atteignant une teneur de 7.10^{-6} d'uranium dans quelques cas très rares. Ce granite n'est pas très altéré. Par contre, le granite du Bas Village a une radioactivité un peu plus élevée que dans la partie sud, mais ce granite, plus ou moins altéré, est riche en biotite, contenant de petits cristaux de zircon.

L'étude de la répartition de la radioactivité par autoradiographie des lames minces nous a conduit à faire les observations suivantes :

a) La biotite contient des petits cristaux de zircon radioactifs entourés de halos pléochroïques. Elle est généralement fraîche, mais l'altération commence à gagner les cristaux par ses contours. Les rayons alpha ne sont émis que par les parties de la biotite altérées en chlorite. Nous avons affaire à une activité diffuse qui paraît cependant concentrée dans les oxydes de fer. Les inclusions dues aux cristaux de zircon ne sont pas très nombreuses ; d'autre part, la biotite n'est qu'assez rarement altérée. Nous ne pouvons, de ce fait, avoir de granite à radioactivité élevée.

b) Les feldspaths sont peu altérés et ne contiennent généralement que de petites quantités d'oxydes de fer plus ou moins radioactifs. On rencontre quelquefois des petits cristaux d'apatite ou de zircon dans les feldspaths, mais leur radioactivité est assez faible et variable.

LA RADIOACTIVITE AU VOISINAGE DES MICASCHISTES

Aux environs de Sautron, non loin du contact du granite et des micaschistes (au NW de Nantes), la radioactivité est assez élevée par rapport à la radioactivité moyenne du granite de la bande granitique. Certains échantillons atteignent une activité de $4,15.10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. On remarque que le granite de cet endroit est orienté, altéré et contient des oxydes de fer radioactifs. En général, la radioactivité est donc plus élevée au contact du granite et des micaschistes.

PLANCHE XX

FIG. 1 a. — Oxydes de fer dans un granite gneissique. *Microphotographie* L.N. $\times 110$.

— 1 b. — Autoradiographie montrant le rayonnement alpha dû à ces oxydes de fer. *Microphotographie* $\times 110$. (Temps de pose : 30 jours).

FIG. 2 a. — Monazite contenant des oxydes de fer. *Microphotographie* L.N. $\times 110$.

— 2 b. — Autoradiographie montrant le rayonnement alpha dû aux oxydes de fer et à la monazite. *Microphotographie* $\times 110$. (Temps de pose : 30 jours).

Le long de la bande de granite du NW de Nantes, entre Nantes et Savenay, le granite s'altère de plus en plus en allant vers Savenay, et s'oriente. Il contient des quantités variables d'oxydes de fer dûs à l'altération. La radioactivité est assez élevée dans ces granites altérés ; elle augmente peu à peu et atteint $9,45 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, dans le granite près de la Petite Haie (affleurement n° 51 E 7).

MINÉRALISATION URANIFÈRE DANS LE GRANITE ORIENTÉ

Récemment, le Commissariat à l'Energie Atomique a fait des recherches et a effectué des mesures dans plusieurs massifs granitiques de Bretagne et de Vendée ; une minéralisation très intéressante a été ainsi mise à jour. Des indices d'une certaine valeur ont été trouvés à la Charpenteraie (affleurement n° 72 C 4), à la Touche (affleurement n° 77 B 3) et au Babinais (affleurement n° 76 B 3). Il s'agit de gisements peu importants où l'on note la présence de sabugalite, d'autunite et de chalcolite dont les teneurs en uranium varie entre 0,26 et 0,9 %.

A la Charpenteraie, la minéralisation se trouve dans une zone très altérée d'environ 2 mètres de diamètre. Les minéraux d'uranium se trouvent surtout dans les fissures du granite où ils sont mal cristallisés. Ils sont visibles à l'œil nu et se présentent sous forme de grands placages sur les parois des fissures de la roche. En outre, l'autunite, ainsi que la chalcolite, se trouvent dans le granite même, mais toujours dans les craquelures des minéraux. La présence d'autunite et de chalcolite sous cette forme de placages, témoigne d'une origine secondaire de ces minéraux. Il apparaît très nettement que les dépôts uranifères sont en relation étroite avec non seulement l'altération de la roche même, mais encore avec la quantité d'eau qui circule dans les fissures. L'uranium peut avoir été transporté, en solution, par les eaux d'infiltration qui ont lessivé les roches.

Malheureusement, les travaux d'exploitation en profondeur ont été suspendus et nous n'avons pas eu la possibilité de faire de sondages à cet endroit. Il nous manque, de ce fait, des données sur l'extension en profondeur de ces minéralisations pour supposer une origine profonde de l'uranium.

A la Touche, les travaux effectués par le C.E.A. ont mis en évidence la présence de sabugalite en petites quantités. Nous n'avons pas pu retrouver ce minéral malgré une recherche minutieuse sur cet affleurement. Par contre, à la Babinais, nous avons trouvé de l'autunite se présentant sous forme de paillettes dispersées dans le granite très altéré.

D'autre part, nous avons mis en évidence la présence d'une minéralisation uranifère sous la forme de petites paillettes qui est très probablement de l'autunite, dans le granite de la carrière des Bois des Bonnes Dames à Saint Etienne de Montluc (affleurement n° 52 E 6). Ce granite est orienté, altéré et contient des quantités assez importantes d'oxydes de fer. L'autunite se fixe surtout sur les cristaux de feldspaths (Pl. XVII, fig. 3 a et 3 b) et de quartz, de la même façon que l'autunite que nous avons rencontré dans les carrières du Maroc et de la Faverie (Vigneux).

L'étude de l'autoradiographie des lames minces montre de fortes inclusions dues à l'autunite, dont la teneur en uranium est de l'ordre de 50 %.

REPARTITION DE L'URANIUM

L'étude de la répartition de l'uranium par l'autoradiographie des lames minces des échantillons récoltés dans la partie nord de la bande granitique du NW de Nantes, nous a permis de faire les observations suivantes :

1. — Dans les granites de la carrière du Bois des Bonnes Dames, le granite orienté est altéré et la biotite est presque complètement chloritisée. Les oxydes de fer sont abondants et se trouvent surtout dans les fissures entre les cristaux.

L'autoradiographie des lames minces montre de fortes inclusions dues à l'autunite ; les oxydes de fer ont eux aussi une radioactivité assez élevée. Ils se localisent principalement dans les chlorites qui deviennent alors radioactives et dans les feldspaths altérés, où ils sont plus ou moins radioactifs.

Enfin, la biotite altérée n'est pas très riche en zircon. L'ensemble de ces caractères confère donc au granite de cet endroit une radioactivité anormale.

2. — Dans plusieurs affleurements, la radioactivité est due uniquement à la présence d'oxydes de fer radioactifs localisés dans les fissures et dans la chlorite. Les zircons sont très peu nombreux. Par contre, nous rencontrons quelquefois de petits cristaux de monazite radioactive dans les micas altérés et dans les feldspaths.

3. — A la Touche, l'autoradiographie des lames minces indique la présence de cristaux bruns foncés et allongés qui sont très probablement de l'hématite, et qui sont radioactifs. La radioactivité assez élevée est surtout concentrée sur les bords de ces cristaux (Pl. XVIII, fig. 1 a et 1 b).

Nous pouvons constater que la radioactivité du granite du NW de Nantes, n'est pas très élevée par rapport à celle du granite du massif de Vigneux. L'uranium se concentre surtout dans les oxydes de fer, exception faite pour quelques petits cristaux de zircon et de monazite qui ne sont d'ailleurs pas très nombreux.

En plus des quelques indices uranifères mis en évidence par le Commissariat à l'Energie Atomique à Malville, nous avons trouvé de l'autunite dans le granite orienté près de Saint-Etienne de Montluc.

III. - RADIOACTIVITÉ DES GRANITES GNEISSIQUES

Les granites gneissiques à l'W-NW de Nantes ont une radioactivité variable. Les résultats des mesures effectuées par la méthode des émulsions photographiques sur les échantillons broyés sont rassemblés dans les tableaux en l'annexe.

La moyenne des mesures faites sur 52 échantillons est de l'ordre de $4,18 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à une teneur en uranium d'environ $16 \cdot 10^{-6}$. La radioactivité est quelquefois très élevée et peut atteindre $9,95 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, soit une teneur de $38,2 \cdot 10^{-6}$ d'uranium. Elle est due, d'une part, aux minéraux accessoires tels que zircon, monazite, apatite ; d'autre part, à l'uranium concentré dans les oxydes de fer et dans la pyrite.

Au NW de Couëron, la radioactivité est essentiellement due à la présence de nombreux zircons et monazite dans la biotite, bien que les oxydes de fer présentent une certaine activité.

Les granites gneissiques de Bouillon (affleurement n° 619) ont une activité assez élevée due à la monazite et aux oxydes de fer radioactifs qui remplissent les fissures de la roche.

Les granites gneissiques, outre la présence de biotite chloritisée et d'oxydes de fer fréquents radioactifs, sont intéressants à étudier par suite de la présence de deux minéralisations assez importantes ; la pyrite et la fluorine violette, que l'on rencontre assez souvent est principalement dans les fissures de ces roches où elles sont bien cristallisées.

La pyrite se présente sous forme de cubes de taille variable ; mais quand elle est localisée dans les craquelures des minéraux cardinaux, elle s'y trouve sous forme de placages et non de cubes.

La fluorine violette est souvent associée à la pyrite. Dans les fissures de la roche, elle est bien cristallisée, mais elle forme aussi quelquefois des placages sur les cristaux de feldspaths ou de quartz, donnant alors à la roche une teinte violette.

La pyrite se trouve en quantité variable, presque dans tous les granites gneissiques, par contre, la fluorine est moins fréquente. Cette association pyrite-fluorine violette est souvent accompagnée d'une minéralisation thorifère. En effet, la monazite se présente assez fréquemment dans ces roches, elle est quelquefois entourée d'une bordure de produits d'altération bruns et radioactifs.

Nous avons, d'autre part, rencontré dans une variété de granite gneissique à feldspaths roses un minéral de thorium qui est très probablement de la thorianite. Nous avons aussi trouvé, dans quelques échantillons, quelques cristaux d'allanite.

MINÉRAUX RADIOACTIFS DES GRANITES GNEISSIQUES

D'après l'examen de l'autoradiographie des lames minces, nous allons étudier successivement ces minéraux.

a. — La pyrite.

Les cristaux de pyrite ne sont pas toujours radioactifs, mais quand ils le sont, la radioactivité, bien que variable, est assez importante. Lorsque la pyrite est localisée dans les craquelures des cristaux, elle est, en général, radioactive. Souvent, au voisinage des cristaux de pyrite, se trouvent des taches d'oxydes de fer eux aussi radioactifs. Enfin, dans certains cas, la pyrite contient des agrégats de petits cristaux de monazite.

Il est logique de penser que l'uranium de la pyrite est d'origine secondaire. En effet, la pyrite est elle-même d'origine secondaire ; la formation de celle-ci correspond à un enrichissement en fer et en soufre, ces deux éléments s'étant surtout concentrés dans les fissures de la roche et ayant même pu, dans des conditions suffisamment favorables, cristalliser sous la forme de pyrite, en entraînant, lors de la cristallisation, l'uranium, très probablement libérés des petits cristaux de zircon et d'apatite qui existaient déjà dans la roche. Le processus d'orientation des granites serait très favorable à la libé-

ration presque totale de l'uranium contenu dans les cristaux accessoires. Cet élément, une fois libéré, circule en solution et est ensuite fixé principalement par les oxydes de fer produits par l'altération et la pyrite. Cet enrichissement en éléments radioactifs au cours de la formation de la pyrite a conduit à des pyrites radioactives. Il est connu que l'uranium a une affinité particulière pour la pyrite (R. Coppens et G. Jurain, 1957) et pour les oxydes de fer (M. D. Karkhanavala, 1958).

L'étude autoradiographique des lames minces a montré que les petits cristaux de zircon entourés de halos pléochroïques dans la biotite, ont perdu une partie de leur radioactivité.

Plusieurs auteurs ont déjà parlé des phénomènes d'altération des roches contenant du zircon. Le zircon est un minéral réputé très stable. Toutefois, K. Rankama et Th. B. Sahama (1950) ont attiré l'attention sur le fait que, malgré la non-altération du zircon, qui est le seul minéral essentiel du zirconium, cet élément possède un cycle géochimique dans l'évolution de la lithosphère.

C. O. Hutton (1950) a décrit des microfissurations dans des cristaux de zircon et attribué cette modification des cristaux à une augmentation de volume, consécutive à l'apparition de l'état métamicté.

D. Carroll (1953) a mis en évidence, dans les cristaux de zircon, un certain nombre de défauts d'homogénéité comme les inclusions et le zoning. Il ajoutait que les craquelures que présentent les faces peuvent permettre la pénétration de solution, entraînant éventuellement un transport de matière.

Enfin, Arie Poldervaart (1955) a montré que les petits cristaux de zircon peuvent être dissouts et résorbés par des oxydes de fer hydratés.

De tout ceci, nous retiendrons que, si au cours de l'altération d'une roche, les cristaux de zircon paraissent demeurer intacts, ils possèdent néanmoins des défauts de structures, pour que l'uranium, contenu dans le réseau, soit libéré au moins une partie et subisse les péripéties de son histoire géochimique ultérieure. Donc, lors de l'altération, les eaux hydrothermales peuvent pénétrer dans les craquelures de zircon et libérer une partie de l'uranium. Celui-ci, une fois libéré, entre en solution et se trouve fixé par les oxydes de fer. L'uranium en solution existait sous la forme U^{4+} ; il a été oxydé en U^{6+} par le fer Fe^{3+} qui est réduit à son tour en Fe^{2+} et précipité avec la formation de pyrite.

Quelquefois, la pyrite est très peu radioactive, tandis que les oxydes de fer voisins le sont plus. Il semblerait donc que l'affinité de l'uranium serait plus forte pour les oxydes de fer que pour la pyrite. Nous pouvons l'expliquer de la façon suivante : les oxydes de fer qui proviennent de l'altération des minéraux ferromagnésiens existaient en solution en même temps que l'uranium. En effet, les oxydes de fer ont une structure beaucoup moins compacte que la pyrite, car ils ne sont pas cristallisés. Ils ont donc une capacité d'absorption de l'uranium plus élevée que la pyrite et sont, de ce fait, plus radioactive.

La radioactivité de la pyrite se présente de deux façons différentes. Dans certains cas, nous rencontrons de la pyrite entièrement radioactive ; dans ce cas, la pyrite ne se présente pas sous forme de cubes, mais de placages qui donnent des trajectoires alpha régulièrement réparties, surtout le placage (Pl. XIX, fig. 1 a et 1 b). Dans d'autres cas,

la pyrite est bien cristallisée et les traces alpha forment de petites concentrations dues à l'uranium absorbé par la pyrite. Ceci montre donc que l'uranium ne précipite pas toujours facilement dans la structure même de la pyrite. Enfin, il semblerait que, quand le milieu était riche en uranium, l'uranium aurait été fixé par la pyrite et par les oxydes de fer, tandis que quand le milieu était pauvre en uranium, celui-ci aurait seulement été fixé par les oxydes de fer (Pl. XIX, fig. 2 a et 2 b).

Dans certains cas, l'association pyrite-fluorine violette est accompagnée d'une minéralisation thorifère très radioactive. Cette minéralisation se présente sous la forme d'un cristal allongé, brun verdâtre et isotrope (Pl. XXII, fig. 1 a et 1 b). La mesure des longueurs des traces alpha émises par ce minéral nous ont permis de déduire que nous étions en présence d'un minéral de thorium, dont la teneur en Th est voisine de 55 %. Il s'agissait très probablement de thorianite. Ce minéral est très peu fréquent et se trouve en cristaux isolés, quelquefois accompagnés de petits cristaux de monazite.

b. — La monazite.

La monazite qui concentre la plus grande partie du thorium n'a certainement pas une origine secondaire ; elle existait déjà dans les granites sans doute sous forme d'inclusions dans la biotite et les processus d'orientation des granites ont libéré la monazite. Or, dans la monazite, contrairement à ce qui se passe pour la pyrite, le thorium fait partie de la structure même du minéral, et est de ce fait, difficilement libérable. La monazite se présentera donc, après libération des biotites, sous l'aspect de cristaux isolés et radioactifs, qui peuvent, dans certains cas, être emprisonnés par la pyrite ultérieurement formée.

Dans d'autres cas, la monazite est entourée par une auréole d'oxydes de fer radioactifs. L'autoradiographie des lames minces (Pl. XXI, fig. 1 a et 1 b) a montré que les traces provenant des produits d'altération sont dues à l'uranium, tandis que les traces, provenant du cristal lui-même sont dues au thorium. L'auréole d'oxydes de fer est donc bien un phénomène secondaire.

c. — La biotite.

La biotite est souvent chloritisée et contient des oxydes de fer principalement dans les plans de clivage. A cause de l'altération, les petits cristaux de minéraux accessoires qui se trouvaient dans la biotite, ont perdu une partie de leur radioactivité qui s'est concentrée dans les oxydes de fer (Pl. XX, fig. 1 a et 1 b).

d. — L'apatite.

L'apatite n'est pas très fréquente dans les granites gneissiques. Il semble qu'elle ait été dissoute au cours de l'altération. L'uranium qui existait dans les cristaux d'apatite est concentré dans les oxydes de fer, localisés dans les fissures de la roche.

e. — L'allanite.

Aux Daudières (affleurement n° 16 H 8), nous avons rencontré dans un granite gneissique porphyroïde, quelques cristaux d'allanite. Cette allanite se présente en petits

cristaux allongés de 2 mm de longueur environ et visibles à l'œil nu. C'est un minéral assez rare, mais l'étude de l'autoradiographie de ce minéral a montré qu'il avait une radioactivité élevée (Pl. XXII, fig. 2 a et 2 b). Il est intéressant de noter que la radioactivité n'est pas très homogène dans tout le cristal.

CONCLUSION

La radioactivité des granites gneissiques est bien supérieure à celle des granites du massif de Vigneux-Orvault. Pour des roches relativement voisines des points de vue pétrographique et chimique, la différence de l'intensité de la radioactivité est à noter. Les conditions qui ont amené l'uranium dans les granites gneissiques ont été très différentes de celles qui l'ont amené dans les granites du massif de Vigneux-Orvault.

Bien que la radioactivité des granites gneissiques puisse s'expliquer par la richesse de ces roches en monazite, en zircon et quelquefois en allanite, il faut laisser aux oxydes de fer et à la pyrite une part importante à l'origine de la forte radioactivité de ces roches. Plus généralement, ce serait l'élément Fe sous la forme ionique de Fe^{3+} et Fe^{2+} qui serait l'origine de la concentration de l'uranium dans les oxydes de fer et dans la pyrite.

L'uranium fixé par la pyrite et les oxydes de fer ne peut provenir que de minéraux préalablement existant dans la roche ; ces minéraux sont essentiellement des minéraux accessoires, tels que zircon et apatite qui, lors de l'altération de la roche ont été libérés de la biotite qui les englobait et qui ont perdu une partie de l'uranium qu'ils contenaient. Cet uranium a passé probablement en solution à partir de laquelle il a été fixé par les oxydes de fer.

Par contre, les minéraux accessoires, tels que la monazite, qui contenaient du thorium bien qu'isolés par altération de la roche, n'ont pas perdu leur élément radioactif. Le thorium se trouve dans le réseau même ; il reste à l'état Th^{4+} et ne voyage pas. Ceci est bien confirmé par le fait que la pyrite et les oxydes de fer n'émettent que des traces alpha, caractéristique de l'uranium.

IV. - RADIOACTIVITÉ DES MICASCHISTES ET DES AMPHIBOLITES

La radioactivité dans les roches métamorphiques est très variable. Les mesures faites par la méthode des émulsions photographiques sur les échantillons broyés (42 mesures) présentent une moyenne de l'ordre de $2,30 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$. On trouvera en annexe les résultats des mesures.

Les micaschistes de la Belle Vue (affleurement n° 21 G 13), de la Corniche (affleurement n° 22 G 13), de la Chollière (affleurement n° 23 G 13) et de la carrière du Taillis (affleurement n° 24 G 11) ont une radioactivité assez normale qui ne dépasse pas la moyenne ci-dessus indiquée. Par contre, les micaschistes de la Jonnellière (affleurement n° 19 G 16 et 20 G 15) et du Pont du Cens (affleurement n° 8 H 14) ont une radioactivité très élevée par rapport aux autres micaschistes.

Au Pont de Cens, nous remarquons que la radioactivité atteint $10,0 \cdot 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à une teneur de $39,2 \cdot 10^{-6}$ en uranium. En effet, ces deux derniers affleurements sont caractérisés par l'abondance de biotites riches en halos pléochroïques, qui entourent des petits cristaux de zircons. La tourmaline aussi est assez fréquente et contient des petites inclusions radioactives.

En ce qui concerne les amphibolites, la variété trouvée à Bois-Graro a une radioactivité faible, tandis que celle qui affleure à la Petite Haie a une radioactivité élevée à cause de l'abondance de petits cristaux de sphène qui est radioactif. L'étude de la répartition de la radioactivité faite sur les autoradiographies des lames minces nous a conduits aux observations suivantes :

1) De petites inclusions sont dues à des cristaux de zircon entourés de halos pléochroïques de la biotite. Mais, la biotite est quelquefois pauvre en zircon et ne montre aucune radioactivité. C'est pourquoi la radioactivité de certains micaschistes est quelquefois très faible.

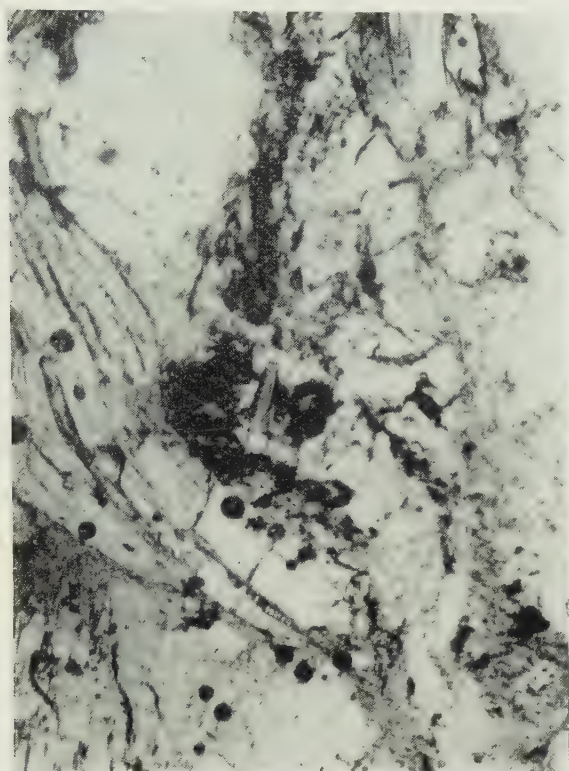
2) L'altération dans les micaschistes est variable. La biotite s'altère en chlorite avec libération d'oxydes de fer qui se trouvent surtout concentrés dans les plans de schistosité de la roche. L'uranium se concentre quelquefois dans les oxydes de fer (Pl. XXIV, fig. 2 a et 2 b). Il est intéressant de remarquer que les oxydes de fer qui se trouvent dans les granites altérés sont plus radioactifs que ceux qui se trouvent dans les micaschistes. Les cristaux de biotite des granites sont généralement plus riches en zircon que ceux des micaschistes. Evidemment, l'uranium libéré dans les granites sera beaucoup plus abondant que dans les micaschistes.

3) La tourmaline, plus ou moins fréquente, joue un certain rôle dans la radioactivité des micaschistes. Il faut noter que la tourmaline elle-même n'est pas radioactive, mais qu'elle renferme, comme la biotite, des petits cristaux de zircon qui eux, sont radioactifs. Nous avons déjà parlé (p. 20) de la présence des petites taches de couleur plus foncée dans les cristaux de tourmaline. Dans les craquelures de ce minéral, le même phénomène se produit. Au milieu de ces petites taches, il y a souvent des cristaux d'un minéral très difficile à déterminer, car sa taille est beaucoup trop petite. Nous avons très probablement affaire à du zircon. L'étude de l'autoradiographie des lames minces nous a montré des petits amas formés de trajectoires alpha dus à ce minéral. La tourmaline est radioactive uniquement dans les parties foncées.

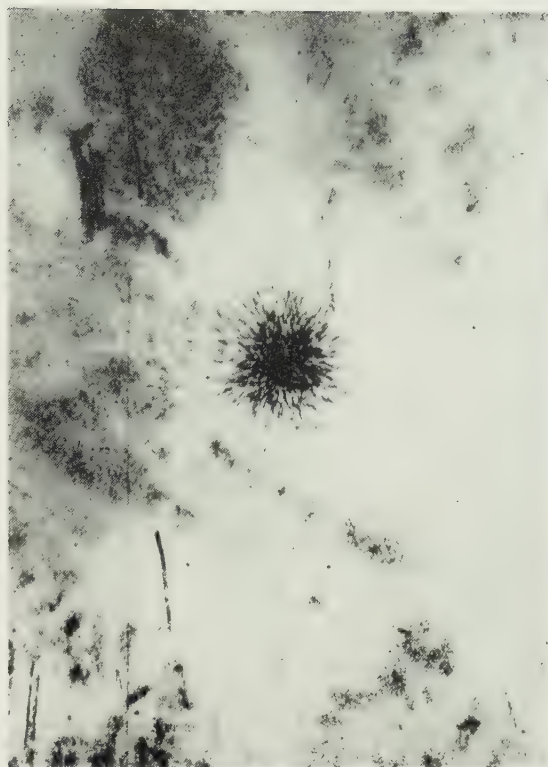
D'autre part, les oxydes de fer qui se trouvent quelquefois dans la tourmaline sont plus ou moins radioactifs, mais généralement ils le sont peu. La présence de ces oxydes de fer dans la tourmaline se traduit par une radioactivité diffuse sur tout le cristal.

PLANCHE XXI

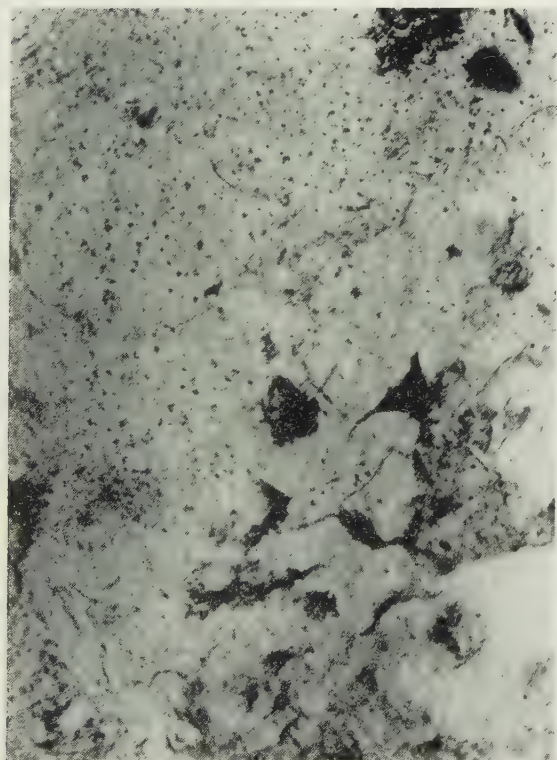
- Fig. 1 a. — Monazite entourée d'oxydes de fer dans un granite gneissique. *Microphotographie L. N.*
 $\times 110$.
- 2 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de cette monazite. *Microphotographie* $\times 110$.
 (Temps de pose : 30 jours).
- Fig. 2 a. — Monazite avec des oxydes de fer dans un granite gneissique. *Microphotographie L. N.*
 $\times 110$.
- 1 b. — Autoradiographie montrant la radioactivité de cette monazite. *Microphotographie* $\times 110$.
 (Temps de pose : 30 jours).



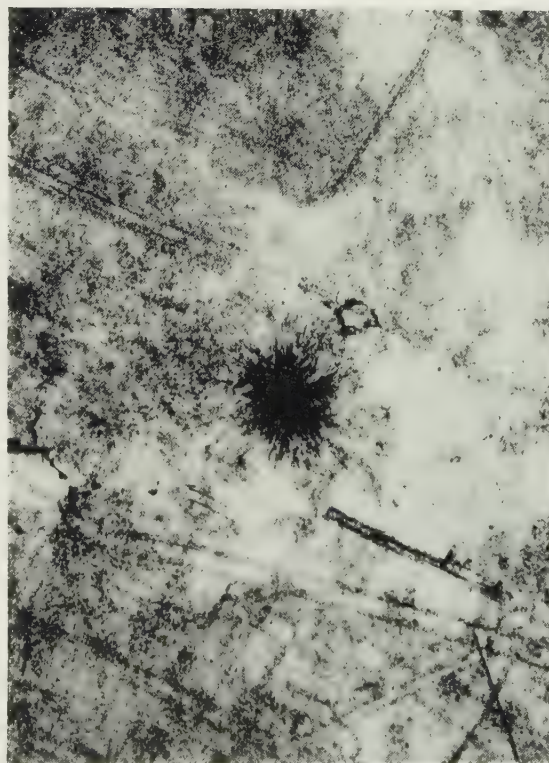
1 a



1 b



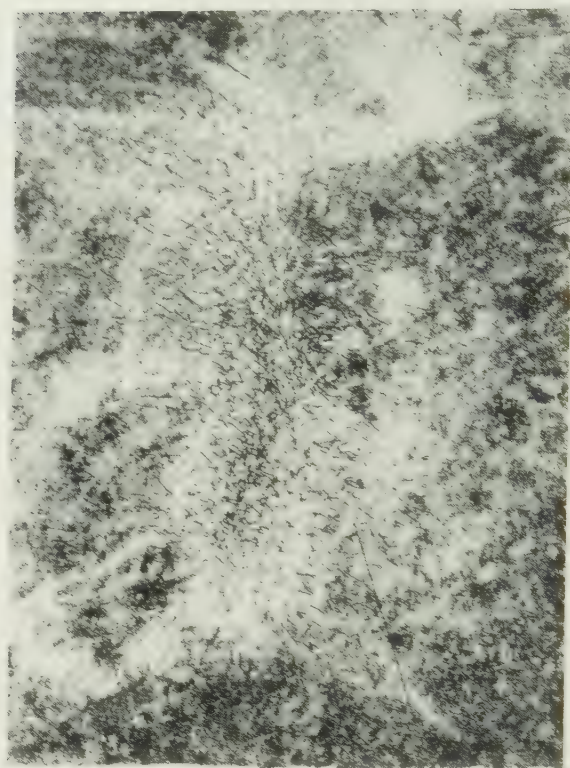
2 a



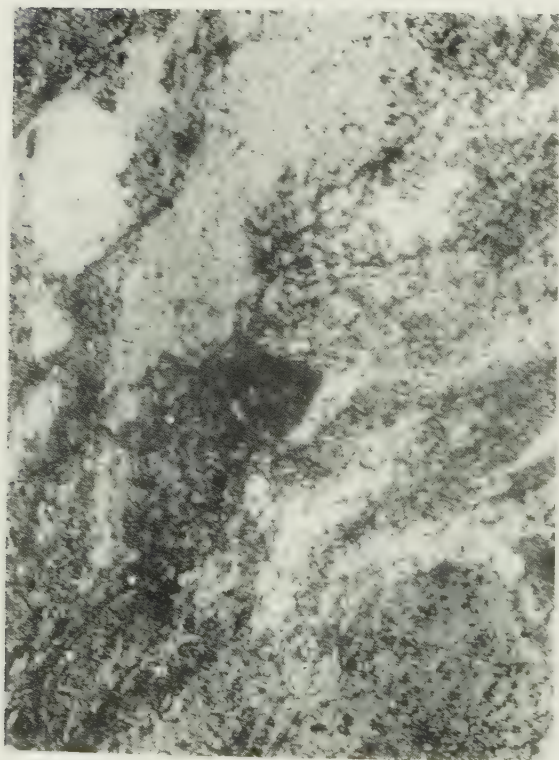
2 b



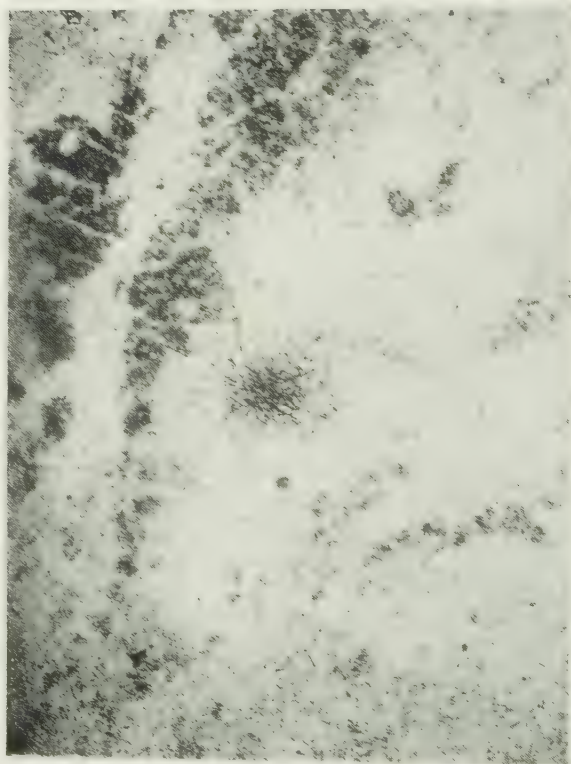
1 a



1 b



2 a



2 b

H. HUSSEIN. — Etude pétrographique et radiogéologique de la région située au Nord de Nantes (Loire-Atlantique)

Nous avons déjà noté la présence de quelques cristaux de staurotide dans les micaschistes de Belle Vue en Pont du Cens. L'étude de la répartition de l'uranium par autoradiographie des plaques minces a montré la présence de quelques rayons α dus à la présence d'uranium dans le staurotide. Enfin, l'autoradiographie des lames minces amphibolites montre quelques inclusions dues à des cristaux de sphène. Les oxydes de fer, dus à l'altération de la hornblende, sont peu radioactifs, ce qui peut se comprendre, car les amphibolites sont généralement pauvres en éléments radioactifs.

CONCLUSION

En conclusion, les micaschistes ont une teneur en uranium assez faible. Ceci est dû à la pauvreté de ces roches en minéraux accessoires, tels que zircon, apatite et sphène qui concentrent généralement la majeure partie de l'uranium des roches.

Dans les cas où les micaschistes contiennent de la tourmaline, la radioactivité est plus élevée, car comme la biotite, la tourmaline contient souvent des petits cristaux radioactifs. Enfin, lorsque les micaschistes sont riches en biotite, la radioactivité augmente.

V. - TENEUR EN URANIUM ET EN THORIUM DANS QUELQUES MINÉRAUX ACCESSOIRES

Nous avons parlé précédemment de l'importance des minéraux accessoires dans la radioactivité des roches. Les éléments radioactifs, en particulier l'uranium et le thorium, sont concentrés dans les minéraux accessoires microscopiques, soit à l'état diffus dans le réseau de ces minéraux, soit sous la forme de petites inclusions. Les roches granitiques contiennent un certain nombre de minéraux accessoires tels que zircon, apatite, sphène, allanite, monazite... Le zircon est le minéral le plus fréquent dans les granites. L'apatite se trouve aussi mais en quantités moins importantes. L'allanite et la monazite ont surtout été rencontrées dans les granites gneissiques.

Il est évident que plus une roche contient de minéraux accessoires, plus elle est riche en éléments radioactifs, à condition qu'il n'y ait pas eu un enrichissement secondaire.

PLANCHE XXII

FIG. 1 a. — Cristal de thorianite dans un granite gneissique. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

— 1 b. — Autoradiographie montrant le rayonnement alpha dû à cette thorianite. *Microphotographie L.N. $\times 110$. (Temps de pose : 8 heures).*

FIG. 2 a. — Oxydes de fer dans un granite gneissique. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

— 2 b. — Autoradiographie montrant le rayonnement alpha dû à ces oxydes de fer. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 30 jours).*

Afin de compléter l'étude de la radioactivité des roches, nous donnerons quelques exemples de teneur en uranium et en thorium des minéraux accessoires les plus fréquents.

a) **Zircon.**

Bien qu'il soit essentiellement un minéral de zirconium, le zircon peut recevoir dans le réseau des quantités variables d'uranium et de thorium. Il se présente en grains allongés ou ovoïdes, ou aussi quelquefois en prismes pyramidés. Le zircon se trouve le plus souvent dans la biotite, plus rarement dans les feldspaths et dans le quartz. Quand il est dans la biotite, il est presque toujours entouré de halo pléochroïque, dont la teinte est d'autant plus foncée que le zircon est plus radioactif et la roche plus ancienne. Nous avons constaté une relation entre la fréquence de halos pléochroïques et le degré de radioactivité de la roche.

Nous avons déterminé l'activité de quelques cristaux de zircon, les résultats sont exprimés en $\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$ dans le tableau X.

TABLEAU X

Activité Uranium ($\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$) (en %)		Observations	Activité Uranium ($\alpha/\text{cm}^2/\text{s}$) (en %)		Observations
0,16	0,10	Zircon dans une biotite altérée	0,47	0,27	Zircon dans une biotite altérée
0,12	0,07	» » » »	0,32	0,18	» » » »
0,10	0,05	» » » »	0,97	0,55	Zircon dans une biotite très peu altérée
0,29	0,17	» » » »	0,88	0,50	» » » »
0,52	0,30	» » » »	0,83	0,47	» » » »
0,65	0,37	» » » »	0,55	0,32	Zircon dans les feldspaths
0,58	0,33	» » » »	0,30	0,17	» » » »
0,43	0,25	» » » »			

Sachant que l'activité moyenne d'un granite est de l'ordre de $1.10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, nous constatons donc que l'activité du zircon est en moyenne de l'ordre de 5 000 fois plus grande que celle d'un granite.

Nous remarquons que l'activité des zircons qui se trouvent dans les biotites chloritisées est nettement plus faible que celle des zircons des biotites peu altérées. Ceci illustre bien ce que nous avons supposé sur la libération d'une partie de l'uranium contenu dans le zircon.

b) **Apatite.**

La radioactivité de ce minéral est surtout due au remplacement isomorphique du calcium par l'uranium. L'importance de ce minéral dans la contribution à l'activité des roches étudiées est secondaire. Nous donnerons dans le tableau XI l'activité de quelques cristaux d'apatite.

TABLEAU XI

<i>Activité ($\alpha/cm^2/s$)</i>	0,05	0,13	0,12	0,13	0,10
<i>Teneur % Uranium</i>	0,04	0,10	0,10	0,10	0,08

Nous notons que l'activité de l'apatite n'est pas très élevée et atteint des valeurs du même ordre de grandeur que les plus faibles teneurs dans les zircons. Nous pouvons expliquer ce fait par la facilité avec laquelle les apatites sont altérées.

c) Monazite.

La monazite est le minéral le plus important dans la concentration du thorium. Elle contient cependant aussi un peu d'uranium. Ce minéral est très fréquent dans les granites gneissiques où il joue le plus grand rôle dans la radioactivité de ces roches. Nous reportons dans le tableau XII l'activité de quelques monazites.

TABLEAU XII

<i>Activité ($\alpha/cm^2/s$)</i>	0,47	0,39	0,72	1,02	1,44	2,00	2,08	5,32	6,42
<i>Teneur % Thorium</i>	1,20	1,00	1,80	2,50	3,60	5,00	5,30	?	?

Parmi ces monazites, il y en a deux qui ont une radioactivité très forte. En effet, ces deux minéraux sont entourés d'oxydes de fer radioactifs provenant de l'altération des roches.

d) Allanite.

Nous avons rencontré quelquefois l'allanite qui se présentait en petits cristaux dans les granites gneissiques. Dans certains cas, le minéral était assez grand et pouvait atteindre 2 mm de longueur. Ceci nous a permis de faire plusieurs mesures en différents endroits du même cristal pour mettre en évidence l'hétérogénéité dans la distribution des éléments radioactifs dans le minéral. Les résultats sont donnés dans le tableau XIII.

TABLEAU XIII

<i>Activité ($\alpha/cm^2/s$)</i>	0,52	0,69	0,77	0,64	0,61	0,65	0,64	0,58	0,39	0,52
<i>Teneur % Uranium</i>	1,04	1,38	1,53	1,28	1,22	1,29	1,28	1,16	0,78	1,04

e) **Pyrite et oxydes de fer.**

En plus de ces minéraux accessoires primaires, nous donnerons encore quelques valeurs d'activité alpha de la pyrite et des oxydes de fer. Le tableau XIV résume les valeurs effectuées sur ces minéraux d'origine secondaires.

TABLEAU XIV

	Pyrite		Oxydes de fer				
Activité ($\alpha/cm^2/s$)	1,12	2,12	0,43	1,34	0,24	0,33	0,14
Teneur % Uranium	0,82	1,53	0,60	1,85	0,32	0,46	0,19

Il est important de constater que l'activité des oxydes de fer, et en particulier de la pyrite, est assez variable. Dans certains cas, le nombre d'alpha émis est même supérieur à celui du zircon et se rapproche de celui de monazite. Ceci montre bien que l'uranium contenu dans ces minéraux y a été concentré secondairement.

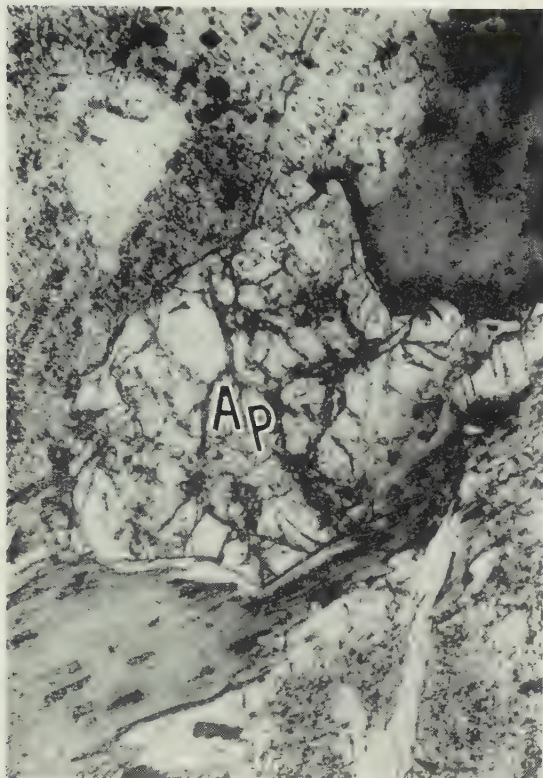
PLANCHE XXIII

Fig. 1 a. — Cristal d'apatite (Ap) dans un granite. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

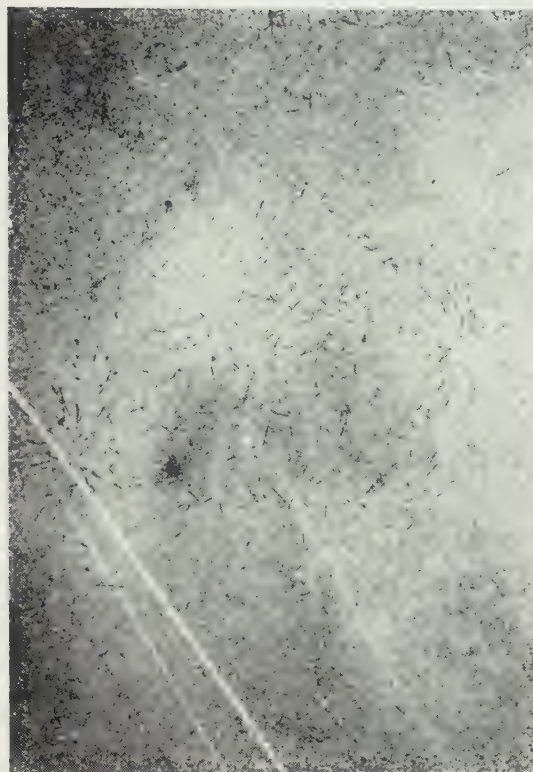
— 1 b. — Rayonnement alpha dû à cette apatite. *Microphotographie L.N. $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours).*

Fig. 2 a. — Partie d'un cristal d'allanite. *Microphotographie L.N. $\times 110$.*

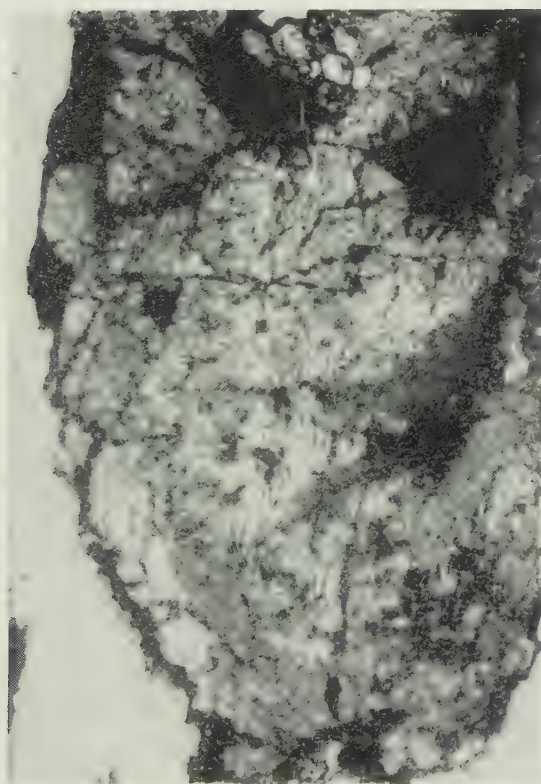
— 2 b. — Rayonnement alpha dû à cette allanite ; on remarquera l'hétérogénéité de la distribution des traces alpha. *Microphotographie $\times 110$. (Temps de pose : 60 jours).*



1 a



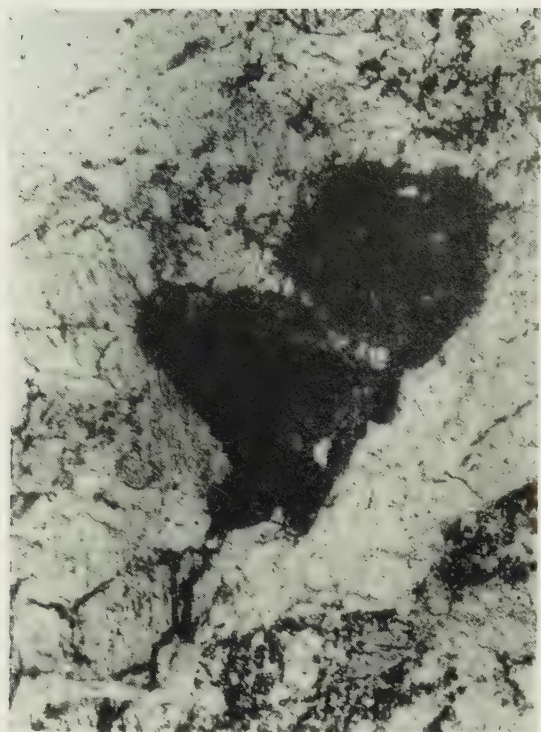
1 b



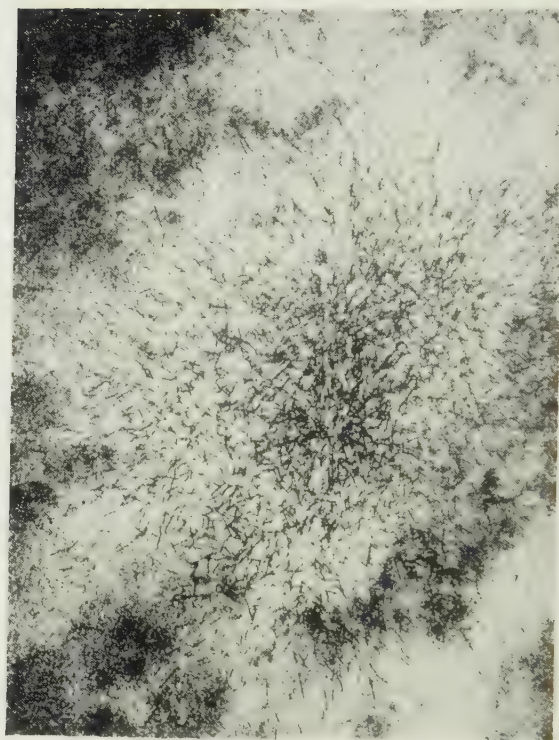
2 a



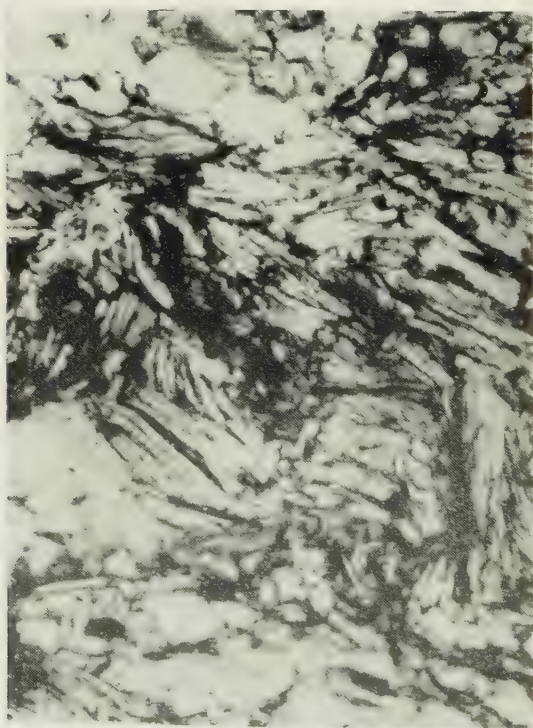
2 b



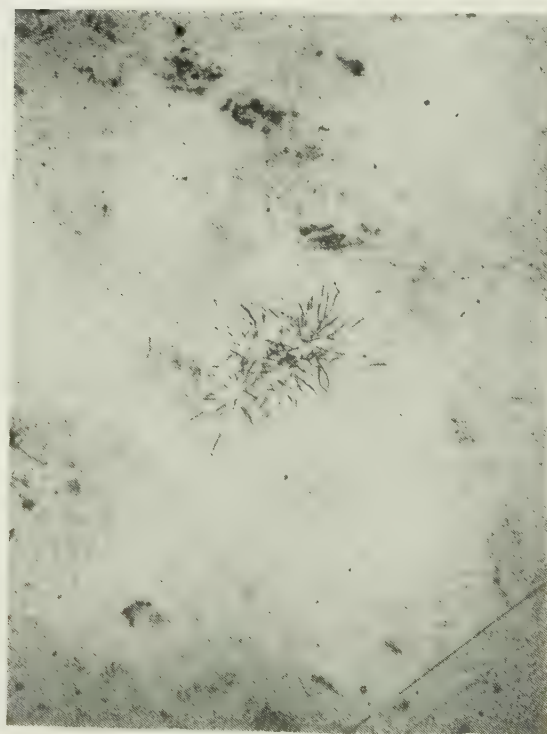
1 a



1 b



2 a



2 b

CHAPITRE IV

GÉOCHIMIE DE L'URANIUM

I. - RÉPARTITION DES TENEURS EN URANIUM

Nous avons dosé l'uranium par la méthode fluorimétrique qui repose fondamentalement sur le fait qu'une perle de fluorure de sodium contenant des sels d'uranium, exposée aux rayons ultra-violets, donne une fluorescence vert jaune. L'intensité de la fluorescence est proportionnelle dans de larges limites à la quantité d'uranium présent (E. L. Nichols et M. K. Slattery, 1926). Cette fluorescence est inhibée par un certain nombre d'éléments (triade du fer en particulier), si bien qu'il n'est pas possible, sauf dans certains cas favorables (numéraux isolés), de faire une fluorimétrie directe. Ceci conduit à une séparation de l'uranium de la roche.

EXPOSE ET DISCUSSION DE LA METHODE FLUORIMETRIQUE

PREPARATION DE SOLUTIONS

Diverses opérations préliminaires (attaque, séparation, extraction) aboutissent à une solution contenant en principe tout l'uranium.

PLANCHE XXIV

FIG. 1 a. — Oxydes de fer dans un granite gneissique. *Microphotographie L.N. × 110.*

— 1 b. — Rayonnement alpha dû à ces oxydes de fer. *Microphotographie L.N. × 110. (Temps de pose : 60 jours).*

FIG. 2 a. — Oxydes de fer dans un micaschiste. *Microphotographie L.N. × 110.*

— 2 b. — Concentration des traces alpha due à ces oxydes de fer dans le micaschiste. *Microphotographie × 110. (Temps de pose : 60 jours).*

a) Attaque.

La roche quartée, broyée, porphyrisée à 200 mesh est séchée à poids constant (étuve à 105°). Un gramme ou plus est porté dans un bécher de 250 cm³ avec environ 20 cm³ d'eau régale. L'attaque est conduite pendant environ trois heures sur plaque chauffante. On laisse alors refroidir et l'on filtre en lavant soigneusement le résidu à l'eau distillée chaude. La solution chlorhydrique obtenue contient en principe tout l'uranium, mais également tous les chlorures solubles.

b) Séparation.

L'uranium sera séparé d'un certain nombre de métaux par traitement de la solution chlorhydrique par l'ammoniaque 7 N ($\frac{1}{2}$) et ceci permettra de repasser en milieu nitrique en vue de l'extraction.

La solution de chlorure est traitée par l'ammoniaque jusqu'au début de la précipitation ; on revient alors en milieu acide en ajoutant le minimum d'acide nitrique ; on porte à l'ébullition. On précipite alors par l'ammoniaque les hydroxydes insolubles à pH-8 environ. Il est nécessaire ici de couvrir soigneusement le bécher où se fait la précipitation et l'entonnoir de filtration (en effet, le gaz carbonique de l'air donne avec l'ammoniaque et l'uranium un composé soluble). L'uranium est précipité à l'état d'hydroxyde insoluble accompagné du fer, manganèse, etc... qu'il est nécessaire de séparer en vue de dosage fluorimétrique.

c) Extraction.

L'extraction des traces d'uranium (à l'état de nitrate d'uranyle) se fait toujours en milieu nitrique en utilisant comme solvant extracteur l'éther (sulfurique — éthylique), l'acétate d'éthyle, des esters, des alcools supérieurs, etc... On dissout le précipité d'hydroxydes par l'acide nitrique chaud. La solution nitrique est alors portée à sec au bain de sable. Le résidu de nitrate sera repris par l'acide nitrique 3,5 N. Cette solution nitrique, environ 40 cm³, est mise dans des ampoules à décanter. On ajoute alors un volume sensiblement égal de solution relargante (solution composée de nitrate d'alumine et de nitrate d'ammonium en milieu nitrique), ceci dans le but d'aider la séparation du solvant organique qui, dans notre cas, est un ester phosphorique du butanol. Trois agitations successives sont faites pour épuiser la solution nitrique du nitrate d'uranyle qui passe dans l'ester qui, plus léger, est séparé et contient tout l'uranium.

L'uranium est séparé du solvant par traitement des ampoules à décanter par le carbonate d'ammonium à 20 % en poids. L'uranium est alors dissous sous forme de complexe dans ce carbonate d'ammonium qui est mis en fiole jaugée.

FLUORIMETRIE PROPREMENT DITE

Des nacelles de platine de 8 mm de diamètre et de 2 mm de profondeur sont utilisées pour cette opération. Chaque dosage est fait en triple exemplaire et nécessite

l'emploi de neuf nacelles, trois pour recevoir une solution étalon, trois pour recevoir la solution à doser (inconnu), et les trois autres pour effectuer un essai à blanc.

0,1 cm³ d'une solution étalon à 0,1 gamma d'uranium par cm³ est déposé dans chaque nacelle de la colonne étalon. La même chose est faite avec la solution de carbonate d'ammonium de la fiole jaugée provenant du traitement de l'inconnu. La colonne « blanc » ne reçoit rien. Les nacelles sont portées sur un bec Bunsen pour évaporation et destruction du carbonate. Cette opération achevée, on remplit les nacelles d'un mélange de fluorure et de carbonate de sodium dans la proportion d'une partie pour neuf parties. Ce mélange est fondu sur un gros bec Mecker. Après la fusion, les nacelles refroidies sont passées au fluorimètre.

Ce fluorimètre est essentiellement composé d'une lampe à vapeur de mercure. Les rayons ultra-violets émis sont filtrés par une série d'écrans ne laissant passer que les U.V. de 3 650 Å de longueur d'onde. Une optique de quartz concentre le faisceau sur la nacelle. La fluorescence, émise dans la portion visible du spectre, est filtrée par des écrans jaune et vert, puis recueillie par la photocathode d'un photo-multiplicateur RCA 981 A. Ce dernier est alimenté par une haute tension stabilisée et l'intensité du courant délivré par le photo-multiplicateur est mesurée par un galvanomètre dont la résistance intérieure est de l'ordre de 1200 ohms.

Les calculs relatifs aux échantillons sont aisés. On établit les trois moyennes arithmétiques des résultats obtenus respectivement avec les « blancs », l'étalon et l'inconnu. On retranche aux valeurs moyennes obtenues pour l'étalon et l'inconnu celle du blanc. Enfin, on admet que la valeur de l'intensité de la fluorescence est proportionnelle à la quantité d'uranium. On se rapporte alors au poids primitif de la prise échantillon.

ERREURS DE LA METHODE

Le dosage de l'uranium par la méthode fluorimétrique conduit à des erreurs qui sont de l'ordre de celles obtenues par la méthode des plaques nucléaires. Les résultats sont valables dans une limite de ± 20 %. Ces erreurs proviennent de l'échantillonnage, de l'attaque et de la séparation.

a) Erreur due à l'échantillonnage.

Nous avons déjà parlé de l'erreur due à l'échantillonnage dans la méthode des plaques nucléaires faites sur les échantillons broyés. Cette erreur est moins importante dans la méthode de fluorimétrie, car l'échantillon est porphyrisé et la taille des grains est très petite (200 mesh), ce qui permet d'obtenir une homogénéité presque totale dans tout l'échantillon. L'uranium contenu dans les petits cristaux des minéraux accessoires (zircon, monazite, etc...), ainsi que celui qui est contenu dans les oxydes de fer ou dans les minéraux d'uranium a plus de chance d'être séparé et dispersé dans l'échantillon porphyrisé.

b) Erreur due à l'attaque.

L'uranium existe dans les roches sous différentes formes. Nous appliquons toujours la même attaque sur tous les échantillons. Or, dans certains cas, cette méthode peut être insuffisante pour obtenir une séparation complète de l'uranium et des autres métaux.

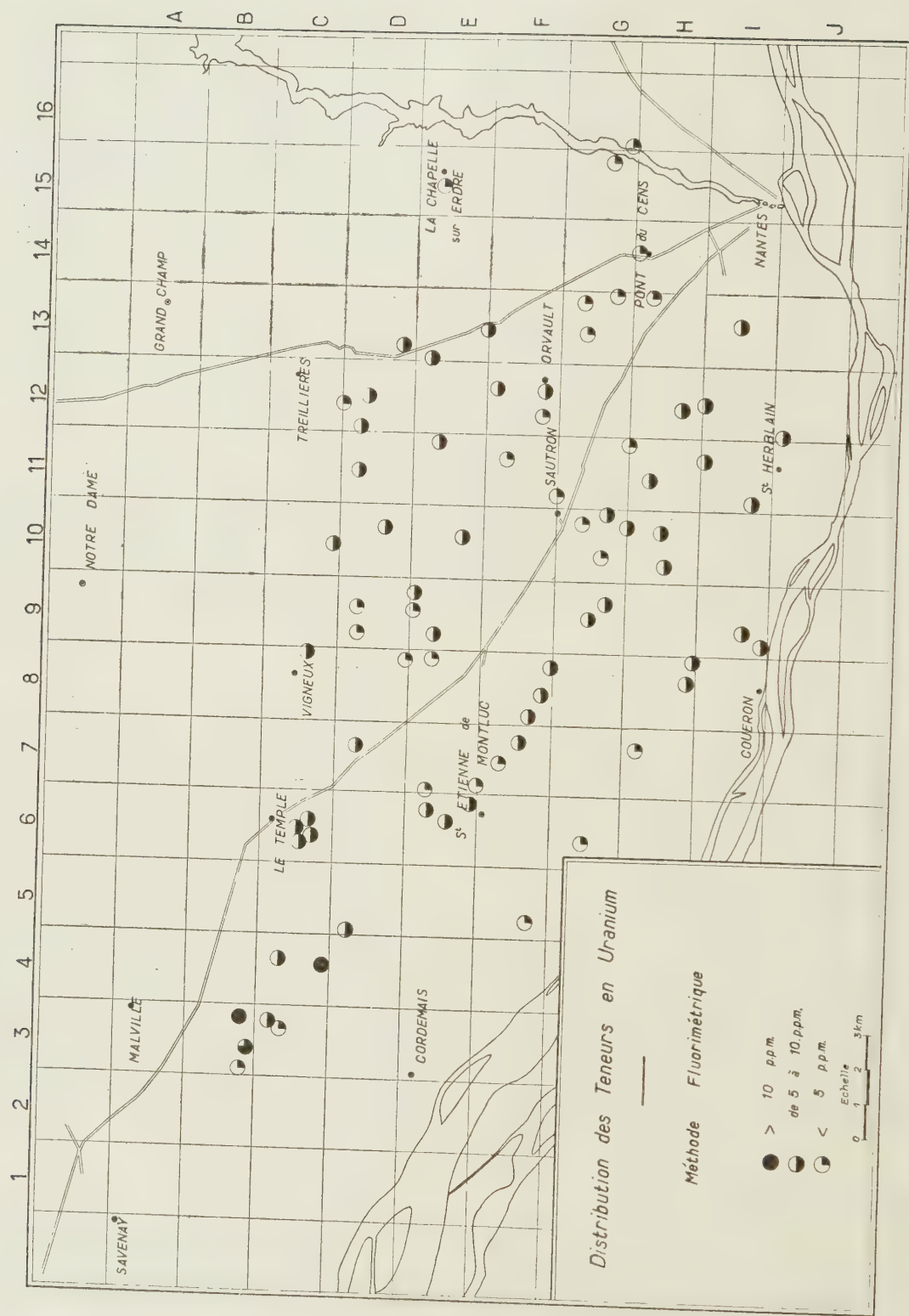


Fig. 8. — Carte représentative de la distribution des teneurs en uranium (méthode fluorimétrique).

Cependant, cette erreur est presque négligeable puisque l'on se trouve presque toujours dans les mêmes conditions.

c) Erreur due à la séparation.

La séparation de l'uranium nécessite un certain nombre de précautions, dont la plus importante est l'ajustement du pH. En effet, au delà de 8, l'uranium précipite d'où l'utilisation d'un indicateur coloré, permettant de reconnaître l'acidité ou la basicité de la solution.

L'uranium se trouve, dans le cas des roches altérées, avec les oxydes de fer et dans les cristaux des minéraux accessoires. Si l'altération est très poussée, une grande partie de l'uranium se trouve concentrée dans les oxydes de fer. Il semble que la méthode de séparation de l'uranium décrite auparavant ne soit pas toujours suffisante, et l'uranium dosé ne représente alors qu'une seule partie de l'uranium contenu dans la roche.

Dans certains cas, l'erreur peut alors atteindre jusqu'à 50 %, ce qui nous entraîne à penser que le dosage de l'uranium par fluorimétrie est, dans certains cas particuliers, très sujet à caution.

DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats du dosage de l'uranium par la méthode fluorimétrique faite sur les échantillons porphyrisés sont reproduits dans les tableaux figurant en annexe. La figure 8 montre une carte de la distribution des teneurs en uranium dans toute la région étudiée.

En comparant les teneurs en uranium déterminées par fluorimétrie et celles obtenues par la méthode des émulsions photographiques, nous sommes amenés à faire les remarques suivantes.

1) Dans certains cas, les teneurs en uranium déterminées par fluorimétrie sont plus élevées que celles déterminées par les plaques nucléaires. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'uranium n'est pas toujours en équilibre dans les roches. Même dans les roches anciennes, l'équilibre radioactif n'est pas toujours réalisé, car les gaz qui ont pris naissance par désintégration radioactive ont pu diffuser et d'autres éléments ont pu être solubilisés et entraînés plus ou moins sélectivement. La méthode des plaques nucléaires de dosage des éléments radioactifs supposent un équilibre entre l'uranium et ses descendants, ce qui n'est pas toujours le cas.

2) Nous remarquons quelquefois que la radioactivité déterminée par les plaques nucléaires est beaucoup plus élevée que celle déterminée par fluorimétrie. En calculant les teneurs en uranium et thorium par la méthode des plaques nucléaires, nous avons supposé le rapport Th/U égal à 3, ce qui n'est pas toujours le cas. Nous avons déjà entrevu cette cause d'erreur en discutant les erreurs introduites par la méthode des plaques nucléaires. Nous avons constaté que le rapport Th/U est très variable et peut atteindre dans certains cas une valeur d'environ 20.

La plupart des échantillons étudiés sont des roches très altérées, dans lesquelles nous avons même supposé un enrichissement en éléments radioactifs. Il est très difficile de considérer un état d'équilibre dans ces roches et c'est surtout pour cette raison que nous constatons une telle différence entre les teneurs en uranium déterminées par les deux méthodes.

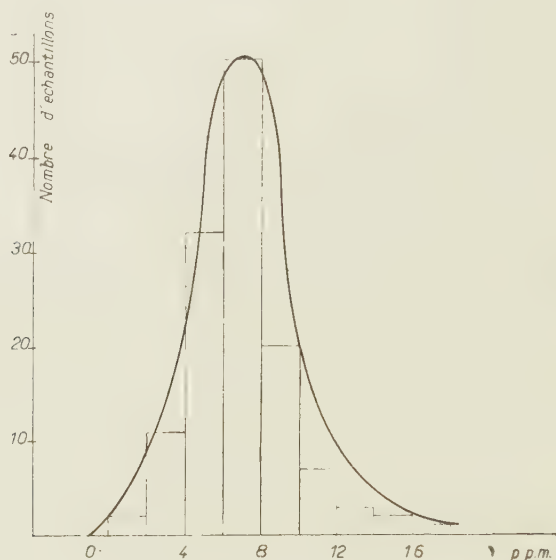


FIG. 9. — Histogramme de la répartition des teneurs en uranium déterminées par la méthode fluorimétrique dans le granite de la partie est du massif de Vigneux.

Dans quelques cas, très rares d'ailleurs, nous avons constaté une très grande différence entre la teneur en uranium déterminée par les plaques nucléaires et par fluorimétrie. C'est le cas du granite brun de « la Roche ». Nous remarquons que la teneur en uranium déterminée par la fluorimétrie s'élève à $0,89 \cdot 10^{-6}$, alors que par les plaques nucléaires nous trouvons $28,1 \cdot 10^{-6}$. Ce dernier résultat ne semble pas excessif car l'examen des autoradiographies de cet échantillon montre une importante concentration d'uranium dans les oxydes de fer produits par l'altération de la roche. Il semble que l'uranium qui est fixé sur les oxydes de fer n'a pas été entièrement enlevé de son support lors de l'attaque qui devait solubiliser l'uranium. C'est là un inconvénient assez important de la méthode fluorimétrique ; une amélioration dans ce sens étendrait son domaine d'application à tous les cas difficiles.

Enfin, les histogrammes des répartitions dans le granite de la partie est du Massif de Vigneux (fig. 9) et dans le granite du NW de Nantes (fig. 10) indiquent une distribution normale.

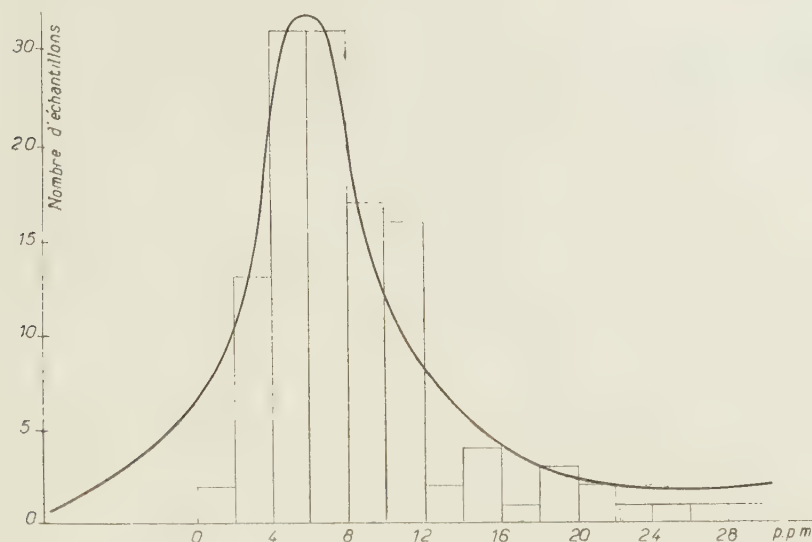


FIG. 10. — Histogramme de la répartition des teneurs en uranium déterminées par la méthode fluorimétrique dans le granite du NW de Nantes.

II. - RELATIONS ENTRE URANIUM ET MÉTAUX ALCALINS (K, Na)

METHODE DE DOSAGE DES ALCALINS

Le dosage des alcalins est une opération assez délicate. Nous avons utilisé la méthode de dosage par photométrie de flamme, après attaque à l'acide fluorhydrique suivant la méthode de Berzélius. Le photomètre est préalablement étalonné avec des mentions étalons de chlorure de sodium et de chlorure de potassium.

Nous pouvons admettre que l'erreur due à cette méthode est de l'ordre de 10 %. Le Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques de Nancy, qui utilise une méthode un peu différente, arrive à une précision de l'ordre de 16,4 % pour le dosage du potassium et 6 % pour le sodium.

DIAGRAMME TERNAIRE U - K - (K + Na)

Nous avons tenté d'exprimer graphiquement les relations qui pouvaient exister entre les teneurs en uranium et en métaux alcalins. Après plusieurs essais, il est apparu que le diagramme ternaire, dont les pôles sont occupés par U - K - (K + Na), est très instructif.

Les résultats sont assez différents pour les granites et pour les schistes.

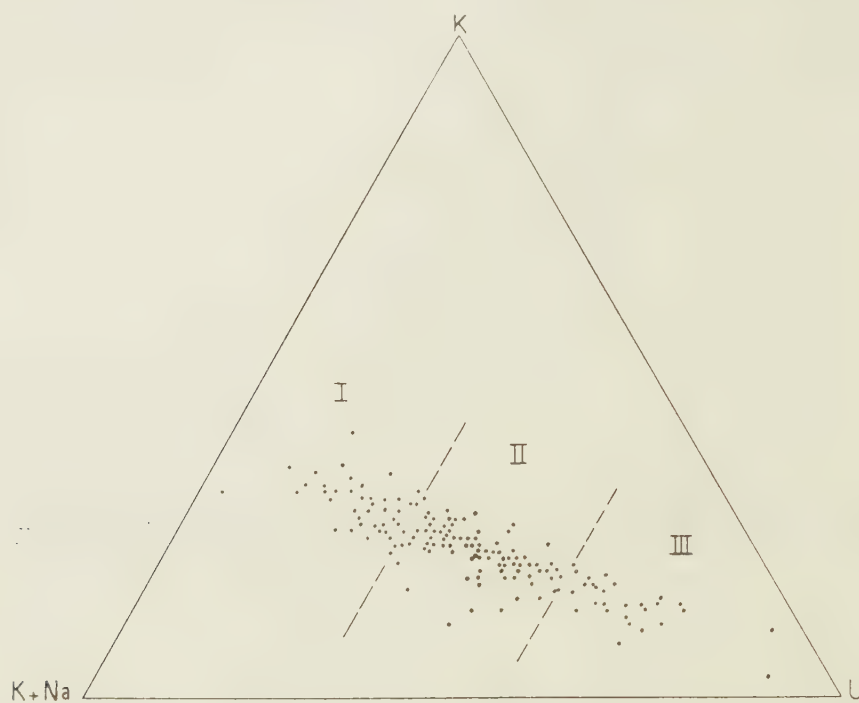


FIG. 11. — Diagramme ternaire montrant la relation entre U, K et (K + Na) dans les granites.

En ce qui concerne les granites (fig. 11), nous constatons tout d'abord que le rapport $K/(K + Na)$ reste pratiquement constant pour tous les échantillons. La moyenne de ce rapport établie pour 161 échantillons de granite est 0,63 ; elle atteint 0,55 pour 23 échantillons de granite gneissique. Les valeurs aberrantes du rapport $K/(K + Na)$ correspondent à des granites très altérés pour lesquels la teneur en Na_2O est bien inférieure à la moyenne, ce qui provient du fait que ces granites ont été lessivés en partie du sodium qu'ils contenaient.

Notre diagramme permet d'examiner les relations qui peuvent éventuellement exister entre la radioactivité des roches et la teneur en K_2O . Plusieurs auteurs se sont penchés sur ce problème ; H. Faul (1954), en particulier, a mis en évidence une relation étroite entre les teneurs en uranium et en potassium dans les roches volcaniques. Une telle relation n'apparaît nullement sur le diagramme ; nous avons par ailleurs tenté sans succès de construire une courbe en portant sur les axes de coordonnées les teneurs en K_2O et en uranium. Pour nos granites, la radioactivité varie dans de larges proportions et ne dépend pas de la teneur en potassium.

Dans ces conditions, et étant donné la constance du rapport $K/(K + Na)$, il n'est pas étonnant de voir sur le diagramme que le rapport $U/(K + Na)$ varie lui aussi dans de larges limites.

Les trois groupes I, II et III indiqués sur le diagramme correspondent à un degré d'altération croissant des granites. Il est remarquable de constater que la teneur en uranium croît de façon régulière lorsque l'altération s'accroît. Ceci est tout à fait conforme à ce que nous avons vu auparavant et montre une fois de plus la grande mobilité de l'uranium au cours de l'altération des roches.

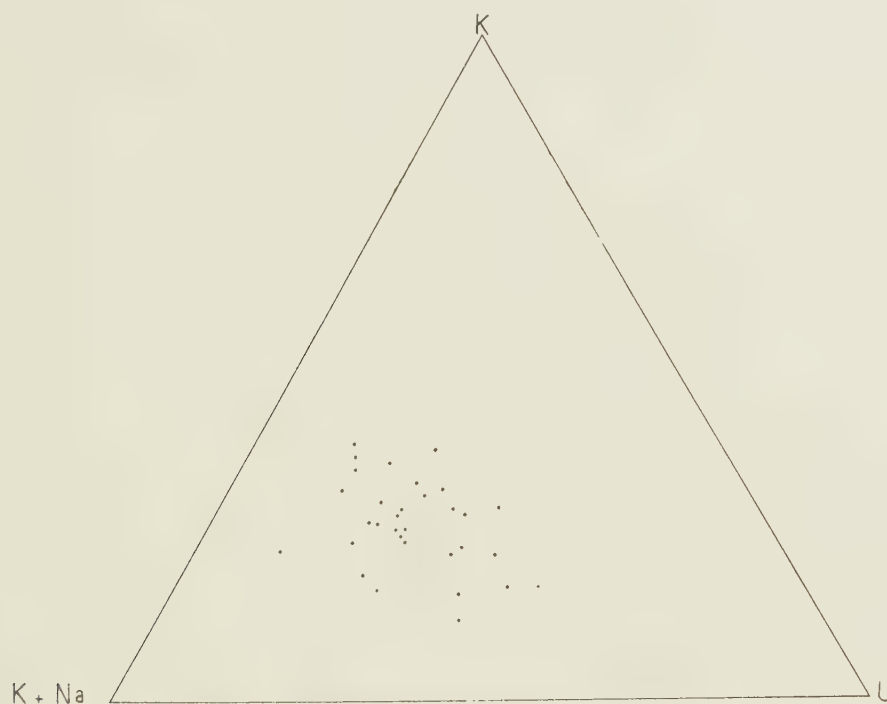


FIG. 12. — Diagramme ternaire montrant la relation entre U, K et K + Na dans les micaschistes.

Les résultats sont beaucoup moins nets pour les schistes (fig. 12). Le rapport $K/(K + Na)$ est beaucoup moins constant, et l'altération des échantillons reste pratiquement la même. Dans ces conditions, les teneurs en K, Na et U semblent être assez indépendantes.

RELATION ENTRE RAYONNEMENT GAMMA ET POTASSIUM

Nous avons déjà signalé la relation existant entre le rayonnement gamma et le potassium ^{40}K . M. Roubault et R. Coppens (1957) ont montré que, dans un granite où ils avaient mesuré 30 chocs/s A. V. P. au compteur Geiger, 3 chocs/s A. V. P. pourraient être dûs à la présence de ^{40}K .

Pour essayer de préciser ces relations dans le domaine qui nous intéresse, nous avons construit une courbe (fig. 13) indiquant en abscisse les teneurs en K_2O (en %) et en ordonnée l'activité gamma mesurée au compteur Geiger. Nous avons indiqué la moyenne des mesures faites sur chaque affleurement, aussi bien en ce qui concerne le K que l'activité gamma.



FIG. 13. — Relation entre l'activité gamma et la teneur en potassium.

Il existe, ainsi que nous pouvons le constater, une relation assez étroite et presque linéaire entre l'activité gamma et les teneurs en potassium. Plus la teneur en K est forte, plus l'activité gamma augmente. Le nombre des résultats est malheureusement insuffisant pour faire des mesures statistiques.

RELATION ENTRE RAYONNEMENT GAMMA ET TENEUR EN URANIUM

L'activité gamma totale est due à trois causes principales : U et Th, K 40 et rayons cosmiques. Sur un diagramme (fig. 14), nous avons essayé de montrer la relation existant entre l'activité gamma et les teneurs en U déterminée par la méthode fluorimétrique. Les erreurs de mesure sont importantes : on ne peut guère espérer obtenir moins de 15 % d'erreur sur la mesure faite au compteur et moins de 20 % sur la détermination par fluorimétrie. Les résultats obtenus n'ont donc qu'une valeur tout à fait indicative.

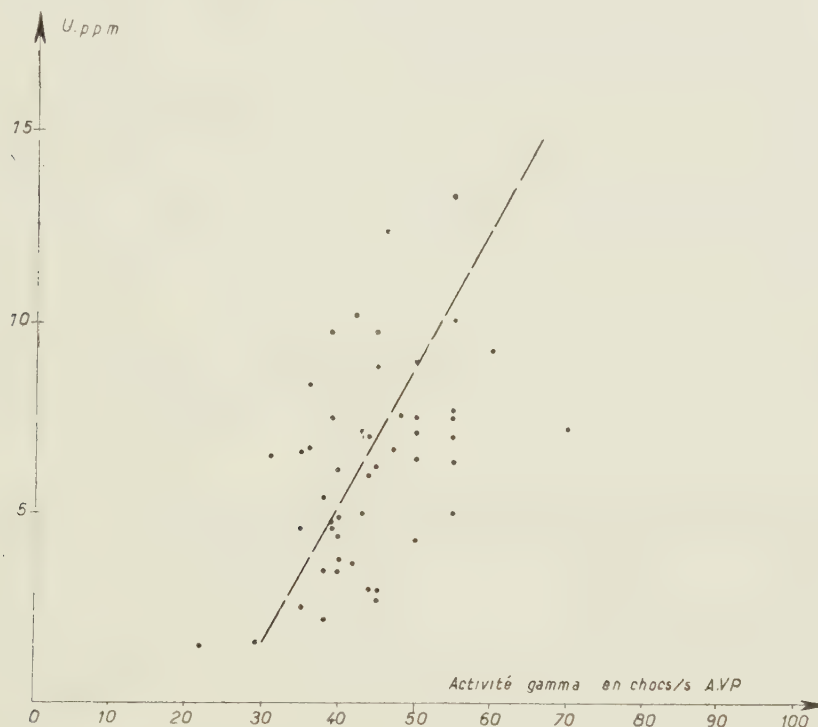


FIG. 14. — Relation entre l'activité gamma et la teneur en uranium.

On peut cependant constater une augmentation de l'activité gamma avec la teneur en U. Comme précédemment, le nombre des mesures n'est pas suffisant pour donner une valeur moyenne.

III. - RELATIONS ENTRE URANIUM ET DIVERS AUTRES MÉTAUX (Pb, Ca, Sr, Ba, Cr, V)

La géochimie de l'uranium est peu connue et la recherche des éléments qui accompagnent l'uranium dans sa localisation ou sa précipitation dans les roches a fait l'objet de plusieurs études de différents auteurs. Mais la plupart des auteurs ont étudié le pro-

blème sur des roches sédimentaires, plus rarement sur des granites ou des roches éruptives en général.

K. Rankama et Th. B. Sahama (1950) signalent que le vanadium peut précipiter avec l'uranium sous la forme de vanadates dans les roches altérées.

A. F. Jr. Trites et E. W. Tooker (1953) ont étudié la relation entre la géochimie de l'uranium et celles du vanadium et de la barytine.

D'autres auteurs pensent à une relation entre l'uranium et le calcium, en supposant une substitution du Ca par l'uranium. C'est, en effet, ce qui se passe dans les phosphates où l'uranium remplace une partie du calcium de l'apatite et de la collophanite ; on sait que les rayons ioniques du Ca^{++} (0,99 Å) et de l' U^{4+} (0,97 Å) sont très voisins et que le remplacement de l'un par l'autre est possible, l'énergie d'échange de l'uranium étant plus grande que celle du Ca. Cependant les études faites dans ce sens n'ont guère porté sur les granites.

Nous avons jugé intéressant de déterminer spectrographiquement quelques éléments qui pourraient avoir une relation avec l'uranium.

Le vanadium, le chrome, le calcium, le baryum, le strontium et le plomb nous ont paru retenir particulièrement notre attention.

Le choix du vanadium et du chrome s'explique par leur position dans la classification périodique des éléments, le vanadium ayant des propriétés voisines de celles du chrome.

LA METHODE SPECTROGRAPHIQUE UTILISEE

Les analyses spectrographiques de ces éléments ont été faites au Laboratoire de Spectrographie du C. R. P. G. de Nancy. La méthode utilisée est basée sur l'analyse par volatilisation complète établie par Slavin.

On place dans une électrode de graphite présentant une cavité un mélange de 15 mg de roche pulvérisée (taille des grains 0,1 mm) et de 15 mg de graphite. Ce mélange est complètement volatilisé dans un arc continu de 9 ampères. Les raies caractéristiques, émises par les éléments soumis à l'arc, sont reçues par une plaque photographique. On mesure ensuite avec un photomètre le noircissement des raies ultimes choisies pour chacun des éléments.

Le spectre d'un échantillon étalon suffisamment riche en Pb, Ca, Ba, Sr, Cr, V et Fe est enregistré dans chaque série d'analyse. On détermine les densités optiques prises comme unité des raies de chaque élément de l'étalon, puis celle des autres échantillons. L'emploi de cette méthode est légitime, car la même quantité de roche est à chaque fois totalement volatilisée. La densité optique est proportionnelle à la concentration de l'échantillon en cet élément. Par mesure de précaution, les mesures ont été faites sur deux et, quelquefois, sur trois raies pour chaque élément, ce qui permet de vérifier l'exactitude des mesures.

Valeur des résultats.

On doit remarquer que les résultats donnés par l'analyse spectrographique n'ont aucune valeur absolue. Ils ne nous donnent pas les teneurs des éléments mesurés dans

les roches, mais nous permettent uniquement de comparer la concentration des éléments dans les différents échantillons.

Nous avons choisi un échantillon étalon qui a été analysé deux ou trois fois sur chaque plaque. Il s'agit de l'échantillon n° 4 H (carrière du Taillis près de Sautron, affleurement n° 28 E 9). C'est un micaschiste peu altéré, riche en tourmaline. La concentration de chaque élément dans cet échantillon a été prise comme unité ; tous les résultats sont donnés (tableau XV) en se basant sur cet échantillon.

DISCUSSION DES RESULTATS

Les analyses que nous avons faites nous ont donné un certain nombre de résultats. Pour tirer de ces faits des conclusions générales, nous avons le choix entre plusieurs méthodes. Il est tout d'abord possible de tracer des cartes montrant la localisation géographique des teneurs. Ce procédé est surtout intéressant si la nature de la roche reste constante sur une étendue suffisante. Il permet d'avoir une idée de la distribution d'un élément dans un massif déterminé.

Par contre, lorsque la répartition des teneurs varie avec la nature des roches et que les roches elles mêmes sont différentes, il est souvent préférable d'employer une méthode statistique. On aboutit alors à une valeur moyenne de chaque type et l'on peut comparer différentes roches entre elles.

Bien entendu, pour avoir une précision suffisante, il est nécessaire d'avoir un grand nombre de données. R. Coulomb (1956), dans un article récent, critique l'emploi des cartes de répartition. Il donne la préférence à une étude statistique des données analytiques.

Nous avons essayé les deux méthodes ; il nous est rapidement apparu que le second procédé donnait des résultats nettement supérieurs. En effet, le nombre des données est suffisant pour avoir une bonne précision des calculs ; cette méthode, en outre, a le gros avantage de comparer aisément aussi bien la distribution des différents éléments dans une roche déterminée, que la répartition d'un élément dans les différents types de roches.

Plomb.

Les teneurs en plomb des différents échantillons sont très voisines et ne nous ont pas permis d'établir une relation nette entre les teneurs relatives en plomb et les concentrations en uranium.

Un seul cas présente quelques originalités. Il s'agit des argiles qui remplissent les cassures des granites à autunite de la carrière du Marroc (affleurement n° 48 E 9). Leur teneur relative en plomb est remarquablement élevée, et atteint 6 et 7,5 fois celle du granite encaissant. C'est la teneur la plus élevée que nous avons eu l'occasion de rencontrer sur l'ensemble du secteur.

On peut donner, de ce fait, une explication assez simple : Dans une série radioactive en équilibre, il y a un rapport entre éléments originaux et éléments dérivés. En particulier, il existe une relation entre uranium, terme initial, et plomb, terme final. Mais s'il

TABLEAU XV

N° d'Echantillon	Pb	Ca	Ba	Sr	Cr	V
4 H (Micaschiste)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6 H (Micaschiste)	0,2	—	0,4	1,0	—	—
15 H (Granite)	0,5	5,2	1,0	0,4	0,2	—
24 H (Granite)	0,5	2,5	0,4	0,8	—	—
26 H (Pegmatite)	0,5	4,1	0,5	1,5	—	—
27 H (Granite)	0,9	5,7	0,6	1,4	—	—
30 H (Granite)	0,4	6,2	0,7	1,7	0,2	0,5
31 b H (Granite)	0,4	8,5	0,7	1,8	0,2	0,3
31 H (Granite)	0,5	9,5	0,9	2,6	—	0,3
32 H (Micaschiste)	0,4	4,9	0,9	1,3	0,3	0,3
35 H (Granite)	0,3	2,6	0,2	0,5	0,1	—
43 H (Granite)	0,4	1,7	0,4	0,6	0,2	—
50 H (Granite)	0,5	3,6	0,7	1,6	0,1	—
69 H (Granite)	0,6	2,6	0,8	1,6	0,2	—
75 H (Granite)	0,5	2,5	0,8	1,4	0,1	—
92 H (Granite gneissique)	0,5	1,5	0,7	1,0	0,1	—
98 H (Granite gneissique)	0,2	2,9	0,4	0,7	—	—
112 H (Granite gneissique)	0,5	2,3	0,3	0,5	—	—
114 H (Granite gneissique)	0,5	3,6	0,4	0,9	0,1	—
128 H (Granite gneissique)	0,6	4,5	1,0	4,7	0,2	0,3
136 H (Micaschiste)	0,5	—	1,0	1,5	1,0	1,3
151 H (Micaschiste)	3,5	2,4	1,0	2,2	0,8	1,0
155 H (Granite)	0,3	0,5	0,2	0,3	0,1	—
159 H (Granite)	0,6	4,3	0,5	1,2	0,1	—
161 H (Granite)	0,5	3,3	0,8	2,1	0,2	—
165 H (Granite)	0,5	3,3	0,5	1,2	—	—
170 H (Granite)	0,5	2,9	0,8	1,3	0,2	—
171 H (Granite)	0,6	1,7	1,0	1,5	0,9	1,2
174 H (Amphibolite)	0,4	12,1	0,6	1,9	2,4	3,3
177 H (Amphibolite)	0,6	11,7	0,2	2,2	1,9	3,8
178 H (Granite gneissique)	0,2	1,0	0,5	1,2	—	—
185 H (Granite gneissique)	0,4	3,9	0,9	1,7	0,1	—
187 H (Granite gneissique)	0,4	0,6	0,4	1,0	—	—
190 H (Granite gneissique)	—	1,0	0,3	1,1	—	—
194 H (Granite gneissique)	0,3	3,7	0,9	1,6	0,9	1,4
213 H (Micaschiste)	0,6	2,5	0,9	2,2	0,5	0,5
217 H (Quartzite)	1,4	3,9	0,7	2,1	0,7	1,6
220 H (Micaschiste)	0,4	1,1	0,3	0,9	0,2	—
227 H (Micaschiste)	0,6	6,1	1,1	2,9	0,6	1,3
229 H (Granite)	0,5	2,8	0,6	1,0	0,1	—
232 H (Granite)	0,4	2,4	0,6	1,0	0,2	—
235 H (Granite)	0,5	3,4	0,5	1,0	—	—
242 H (Granite)	0,4	10,0	1,0	2,2	0,4	0,5
244 H (Granite)	0,4	3,0	0,7	1,1	0,1	—
246 H (Granite)	0,5	4,9	0,9	2,1	0,5	0,7
247 H (Granite)	0,5	5,9	1,0	2,2	0,6	0,8
253 H (Granite)	0,5	2,5	0,4	0,8	—	—
255 H (Granite)	0,5	1,9	0,5	0,7	—	—
267 H (Pegmatite)	0,5	2,0	0,3	0,7	—	—

N° d'Echantillon	Pb	Ca	Ba	Sr	Cr	V
269 H (Pegmatite)	0,5	3,7	0,5	1,1	0,1	—
289 H (Pegmatite)	0,4	2,4	0,7	1,1	0,2	—
292 H (Pegmatite)	0,6	1,9	0,5	1,5	—	—
293 H (Granite)	0,5	2,1	0,3	0,8	—	—
297 H (Granite)	0,5	2,0	0,3	0,8	—	—
299 H (Granite)	0,5	1,2	0,3	0,6	—	—
303 H (Granite)	0,5	2,1	0,3	0,7	—	0,1
309 H (Granite)	0,4	3,0	0,5	1,4	—	—
312 H (Granite)	0,5	2,8	0,5	0,1	1,3	—
323 H (Granite)	0,5	2,8	0,4	0,9	—	0,2
328 H (Granite)	—	1,1	0,3	0,4	0,5	0,8
334 H (Granite)	—	0,6	0,2	—	1,0	0,7
340 H (Granite)	0,5	3,3	0,5	0,9	—	—
344 H (Micaschiste)	0,5	6,2	1,0	2,6	0,9	1,0
348 H (Granite)	0,2	0,9	0,1	0,7	—	—
349 H (Granite)	2,0	0,6	0,2	0,5	0,1	—
351 H (Granite)	0,4	3,9	0,7	2,0	0,1	—
352 H (Granite)	0,3	3,9	0,7	2,2	—	—
354 H (Granite)	0,8	3,2	0,8	2,1	—	—
355 H (Granite)	0,6	5,0	0,6	1,8	—	—
356 H (Granite)	0,5	4,5	0,6	1,8	—	—
357 H (Granite)	0,4	4,4	0,8	2,1	—	—
358 H (Granite)	0,4	4,7	0,8	2,2	—	—
360 H (Pegmatite)	0,3	0,5	0,2	0,2	—	—
361 H (Pegmatite)	0,3	1,5	0,1	0,3	—	—
370 H (Granite)	0,5	1,4	0,4	1,5	—	—
373 H (Micaschiste)	0,5	3,0	0,8	1,8	0,4	0,5
390 H (Micaschiste)	0,5	2,3	0,6	1,5	0,2	0,3
394 H (Granite)	0,4	1,1	0,2	0,4	—	—
403 H (Granite)	0,5	—	0,6	1,5	0,2	0,3
417 H (Granite)	0,1	1,4	0,1	1,2	0,2	—
430 H (Granite)	0,6	2,1	0,7	1,0	0,2	—
444 H (Granite)	0,9	1,4	0,5	1,2	0,3	—
456 H (Granite)	0,3	1,9	0,6	0,8	0,7	0,9
464 H (Amphibolite)	0,9	14,1	0,3	2,2	2,2	3,0
466 H (Amphibolite)	0,7	12,1	—	1,6	1,8	2,6
469 H (Granite)	0,5	2,1	0,3	1,0	—	—
486 H (Granite)	0,8	2,8	0,8	1,3	0,2	—
488 H (Granite)	0,5	2,5	0,6	1,5	—	—
493 H (Granite gneissique)	0,7	5,9	0,8	2,8	0,7	0,8
499 H (Granite gneissique)	2,5	3,4	0,7	2,2	0,2	—
509 H (Granite)	0,8	1,8	0,7	1,1	0,2	—
516 H (Granite)	0,3	2,3	0,7	1,7	—	—
518 H (Granite)	0,3	1,1	0,7	1,7	—	—
520 H (Granite)	0,3	2,0	0,6	1,4	0,2	—
522 H (Granite)	0,2	8,4	0,7	1,4	—	—
589 H (Granite)	0,2	—	0,3	1,2	2,1	—
589 SH (Quartzite)	0,1	—	0,5	0,9	0,9	—
605 H (Argile)	6,0	14,6	0,7	1,7	0,5	—
608 H (Argile)	7,3	4,3	0,6	1,9	0,6	—

Il y a eu un enrichissement relativement récent en uranium, celui-ci ne se trouvera plus en équilibre avec ses dérivés et, en particulier, avec le plomb. Dans ce cas, lorsque l'on dose l'uranium par la méthode des plaques nucléaires et par la méthode fluorimétrique on aboutit à des résultats différents. Dans le cas des argiles dont les teneurs élevées en uranium, mesurées par émulsions nucléaires et par fluorimétrie, sont sensiblement les mêmes ($74 \cdot 10^{-6}$ et $109 \cdot 10^{-6}$), il semble qu'il y ait équilibre et le plomb pourrait être partiellement d'origine radiogénique.

Il est donc possible, dans ce cas particulier, de trouver une relation entre uranium et plomb. Pour tous les autres types de roches étudiées, ceci est, en général, impossible.

Calcium - Strontium - Baryum.

Les alcalino-terreux sont situés dans la seconde colonne de la classification périodique de Mendeleef. Ces éléments sont intéressants, car il est connu que l'uranium peut remplacer isomorphiquement le calcium dans certains minéraux. Ainsi dans les roches phosphatées, l'uranium peut remplacer le calcium dans l'apatite et la collophanite. C'est à cause de leurs rayons ioniques voisins (Ca : $0,99 \text{ \AA}$, U : $0,97 \text{ \AA}$).

Nous avons donc essayé de trouver une relation entre l'uranium et le calcium dans les roches que nous avons étudiées. Pour cela, nous avons tracé une courbe en portant les teneurs en uranium en abscisse et les teneurs en calcium en ordonnée (fig. 15 A). Aux erreurs des analyses près, il apparaît une relation nette entre les teneurs respectives des deux éléments. Très généralement, lorsque la teneur en calcium est élevée, la teneur en uranium est faible, et vice-versa. Nous pensons pouvoir expliquer ce phénomène par un remplacement du calcium par l'uranium surtout dans l'apatite, qui se trouve toujours en petites quantités comme minéral accessoire des granites.

En outre, le strontium peut exister dans les apatites en remplaçant du calcium (K. Rangkama et Th. B. Sahama, 1950). Nous avons donc essayé de déterminer les relations entre l'uranium et le strontium. Nous avons cherché de même les rapports entre uranium et baryum, et construit les mêmes courbes que pour U/Ca (fig. 15 B et C). Nous obtenons des résultats comparables : les roches à forte teneur en uranium ont une teneur en Ba et Sr très peu élevée. Nous accordons cependant à ces résultats une valeur beaucoup moindre que pour le calcium, car les faibles teneurs en Ba et Sr amènent des erreurs analytiques beaucoup plus fortes.

Il nous a paru intéressant également de voir s'il n'existait pas une relation entre Ba, Sr et K. Les rayons ioniques de ces trois éléments sont très voisins :

Sr : $1,21 \text{ \AA}$

K : $1,33 \text{ \AA}$

Ba : $1,49 \text{ \AA}$

et on connaît bien les exemples de remplacement du K par Ba et Sr dans les feldspaths potassiques.

Nous avons donc construit les courbes K/Ba (fig. 15 D) et K/Sr. Nous remarquons généralement que, lorsque la teneur en potassium s'accroît, la teneur en strontium décroît. Ces résultats n'ont naturellement qu'une valeur indicative. Par contre, pour le baryum, il nous a été impossible de trouver une relation analogue. Ceci est tout à fait conforme à ce qu'indiquent les rayons ioniques : le remplacement du K par le Sr est certainement beaucoup plus facile que par le Ba, car la différence des rayons ioniques est beaucoup plus faible.

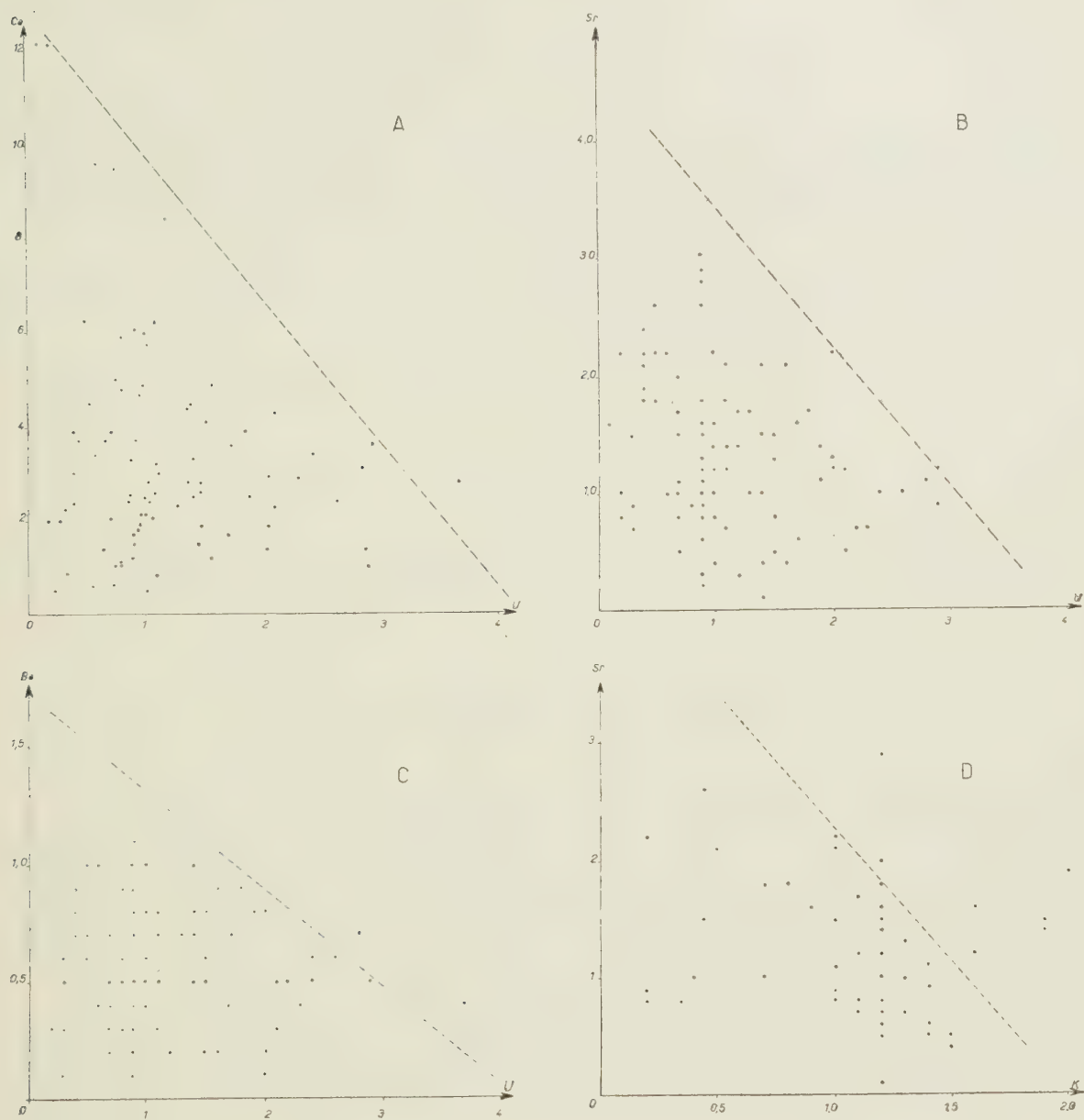


FIG. 15. — A) Relation entre les teneurs en uranium et calcium. B) Relation entre les teneurs en uranium et strontium. C) Relation entre les teneurs en uranium et baryum. D) Relation entre les teneurs en strontium et en potassium.

Conclusions.

1) En ce qui concerne le plomb, presque tous les échantillons étudiés montrent des teneurs voisines. Nous expliquons ce fait par une origine non-radiogénique de cet élément.

Par contre, dans le cas des argiles du remplissage des cassures du granite à autunite de la carrière du Maroc, la teneur en Pb est très élevée et ne peut être expliquée que par une double origine : radiogénique et non radiogénique.

2) Pour les alcalino-terreux, nous remarquons une relation nette entre teneur en calcium et uranium : Lorsque l'uranium est abondant, le calcium ne l'est pas, et inversement. Nous expliquons ce fait par le remplacement du calcium par uranium, surtout dans l'apatite. Une relation analogue existe pour U/Ba et U/Sr, mais elle est beaucoup moins nette que pour le calcium.

3) Pour le chrome et le vanadium, il n'existe aucune relation entre ces deux éléments et les teneurs en uranium dans les roches étudiées.

CHAPITRE V

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Parvenu au terme de ce travail, nous pouvons en tirer les conclusions suivantes, d'ordre pétrographique et radiogéologique.

A. — CONCLUSIONS PETROGRAPHIQUES

La région étudiée comprend en son centre, le massif granitique de Vigneux-Orvault, de forme elliptique, dont la plus grande dimension en Est-Ouest a environ 10 km et le renflement 4 km. Ce massif granitique est en liaison étroite avec un gisement pegmatitique (pegmatites d'Orvault) dont il est séparé par quelques centaines de mètres de micaschistes. Sauf à son extrémité W, où il se rattache à la bande de granite de Pointe du Raz-Nantes, cet ensemble est entièrement entouré par des micaschistes.

Dans ce massif granitique, nous avons pu distinguer un faciès que nous nommons « granite gris ». Ce faciès se caractérise par sa teinte due à sa relative fraîcheur, son grain moyen, et son homogénéité plus ou moins régulière. Il se localise plus particulièrement dans la partie est du massif, mais il arrive de le rencontrer ailleurs. Il est impossible de le séparer nettement par la cartographie du faciès suivant auquel il est étroitement lié.

Ce second faciès, que nous appelons granite brun, se distingue par son grain plus grossier, son altération plus poussée lui conférant une teinte brune due à l'abondance des hydroxydes de fer, et sa richesse en biotite. Ce faciès est particulièrement bien représenté aux environs de Vigneux.

Les pegmatites dont le type est pris à Orvault, en raison de son abondance près de cette localité, sa rencontre aussi en filon traversant indistinctement les deux faciès de granite précédemment cités. Cette pegmatite de teinte généralement blanc jaunâtre contient de gros cristaux de tourmaline, qui sont fréquents, associés avec des grenats. Cette même tourmaline bleue se retrouve également en petits cristaux disséminés dans les deux

faciès du granite de Vigneux-Orvault, sans rapport avec la présence des filons de pegmatites.

La bande de granite de Pointe du Raz-Nantes, à laquelle se rattache ce massif, traverse la région étudiée, entre Savenay et Nantes. Elle a une direction NW-SE, et sépare les micaschistes situés au nord des granites gneissiques du Sud. Le granite de cette bande est plus ou moins identique au faciès gris ci-dessus cité, par sa teinte et sa composition minéralogique. Il s'en distingue nettement par sa structure très visiblement orientée grâce à l'alignement des paillettes de mica.

Les granites gneissiques, situés au Sud de cette bande, ont des faciès très différents selon les lieux d'observation. Ces faciès ont, en commun, la présence de certains minéraux : la pyrite, la monazite, l'allanite, la fluorine violette, et c'est dans ces roches que nous avons rencontré un minéral thorifère en petits cristaux : la thorianite. Ces granites gneissiques sont parfois porphyroïdes, mais presque toujours leurs feldspaths sont perthitiques.

Les micaschistes, situés au N et NE de Nantes, entourent presque complètement le massif granitique de Vigneux-Orvault. Ils sont parfois tourmalinifères et grenatifères, ce qui leur donne une certaine parenté avec les pegmatites du granite de Vigneux-Orvault. Leurs minéraux caractéristiques sont le disthène, le staurotide, et la pennine. Lorsqu'ils contiennent de grands cristaux de tourmaline, cette tourmaline est brune par opposition à celle bleue des pegmatites et granites.

Nous avons noté dans ces micaschistes une évolution des rapports $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/\text{SiO}_2$ et $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{SiO}_2$ qui nous permettent d'affirmer qu'un phénomène global a affecté l'ensemble de ces micaschistes au cours du métamorphisme. Il apparaît que la feldspathisation croissante est accompagnée d'une perte de potassium, celui-ci migrant peut-être dans des zones voisines jouant le rôle de « reins d'accumulation ».

Le sodium se comporte tout différemment, puisque l'ensemble des micaschistes montre un enrichissement en cet élément, toutefois plus marqué dans les parties qui sont les plus dépourvues en potassium et fer. L'ensemble de la région a donc été soumis à une métasomatose sodique ou siliceuse et sodique, et c'est là son trait prépondérant.

B. — CONCLUSIONS RADIOGEOLOGIQUES

Nous cherchions à déterminer la distribution des autres éléments radioactifs dans la région étudiée. Pour cela, nous avons utilisé un compteur Geiger sur le terrain, ce qui nous a permis d'obtenir la répartition de l'activité gamma. Au laboratoire, nous avons déterminé les teneurs en uranium et thorium dans les échantillons prélevés par les méthodes des plaques nucléaires et de la fluorimétrie. La méthode des plaques nucléaires est classique, mais nous avons dû cependant y apporter quelques modifications : lorsqu'il s'agit de poudre à faible teneur, nous avons augmenté le temps de pose jusqu'à deux semaines et examiné une surface de la plaque nucléaire de 1 cm². La méthode fluorimétrique est également bien connue. Elle donne une bonne précision dans les teneurs, mais reste d'un emploi assez délicat. Il est en particulier nécessaire de contrôler très exactement le pH au moment de la précipitation de l'uranium.

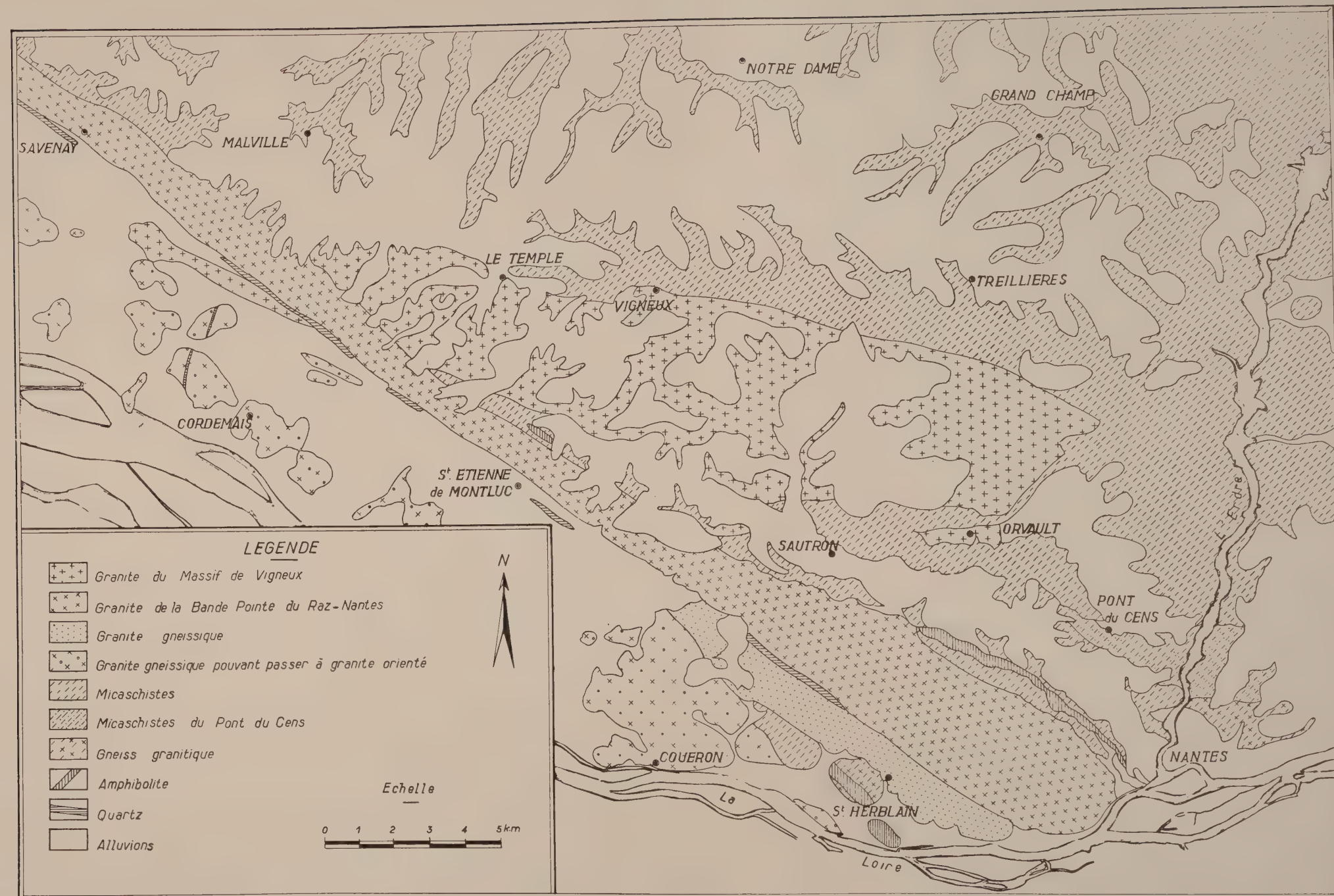


FIG. 16. — Carte géologique de la région étudiée.

REPARTITION DES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS

a) *Dans les granites.* — Nous avons montré qu'il y avait une relation étroite entre l'altération des granites et la localisation des éléments radioactifs. Lorsque la roche est fraîche, l'uranium est surtout concentré dans les minéraux accessoires : zircon, apatite, sphène, monazite, allanite... Au cours de l'altération, une partie de l'uranium est libérée et mise en solution. Lorsque les conditions physico-chimiques se trouvent modifiées, l'uranium peut reprécipiter avec les oxydes de fer qui se forment pendant ce processus et qui se localisent entre les faces de clivage de la biotite chloritisée et dans les fissures de la roche.

Parfois, l'uranium peut même s'exprimer sous forme de minéralisations uranifères. Cette minéralisation se présente sous la forme de paillettes d'autunite qui forment des placages sur les cristaux de feldspaths, et quelquefois sur les cristaux du quartz, dans le granite des carrières du Maroc et de la Faverie en Vigneux, à Verdet en Orvault et dans le granite orienté de la carrière du Bois des Bonnes Dames en Saint Etienne de Mont-Luc. Il nous paraît nécessaire d'insister sur le fait qu'une partie de l'uranium contenu dans les zircons est libérée, bien que les zircons eux-mêmes aient parfaitement résisté à l'altération. Nous avons pu voir, en effet, que le zircon contenu dans les granites peu altérés est beaucoup plus radioactif que celui qui se trouve dans la roche altérée. Ces phénomènes sont suffisamment récents pour que l'équilibre radioactif n'ait pas pu être atteint, ainsi que l'indique la disproportion des résultats donnés par la méthode des plaques nucléaires et par la méthode de la fluorimétrie.

b) *Dans les granites gneissiques.* — La radioactivité de roches peu altérées est ici due essentiellement à la présence de cristaux de monazite, d'allanite et de thorianite. Les processus de mobilisation des éléments radioactifs sont tout à fait comparables à ceux que nous avons décrits pour les granites, mais ici, on peut remarquer que les cristaux de monazite s'enrichissent en éléments radioactifs par la formation d'une pellicule d'hydroxyde de fer riche en uranium. L'abondance de ces monazites, la présence de thorianite montrent que ces formations sont relativement riches en thorium.

Nous avons également trouvé certains cristaux de pyrite radioactive ; cette pyrite étant très probablement d'une origine secondaire, ceci apporte une preuve supplémentaire de l'origine secondaire de l'uranium, mais correspond peut-être à un milieu particulièrement réducteur.

c) *Dans les micaschistes.* — Les processus précédents restent toujours valables. L'uranium se trouve surtout dans les cristaux de zircon et dans les hydroxydes de fer. Mais nous devons noter la présence de tourmaline qui peut contenir des petites inclusions des éléments uranifères.

GEOCHIMIE DE L'URANIUM

Nous avons cherché la relation $U/(Na + K)$ à l'aide d'un diagramme ternaire. On voit ainsi que, dans les granites, le rapport $K/(K + Na)$ reste constant et que la teneur en uranium augmente avec l'altération. Cette relation est beaucoup moins constante dans les micaschistes. Ceci tient sans doute au fait que les zones d'altérations sont beaucoup moins bien délimitées.

Nous avons également essayé de voir s'il existait une liaison entre uranium et alcalino-terreux. Nous avons montré qu'il ya une sorte de remplacement isomorphique de ces éléments. Le phénomène est particulièrement sensible pour le calcium : toute teneur élevée en calcium s'accompagne d'un appauvrissement relatif en uranium, et inversement. Ceci est certainement dû au fait que les rayons ioniques des deux éléments sont presque égaux.

ANNEXE : RESULTATS DES ANALYSES

I. — LE MASSIF GRANITIQUE DE VIGNEUX-ORVAULT

1. — LA PARTIE EST

	$\alpha/cm^2/s$	U. 10 ⁻⁶ (P. N.)*	U. 10 ⁻⁶ (F.)*	Na ₂ O %	K ₂ O %		$\alpha/cm^2/s$	U. 10 ⁻⁶ (P. N.)*	U. 10 ⁻⁶ (F.)*	Na ₂ O %	K ₂ O %
ORVAULT, CARRIÈRE DE LA GRÉE (affl. n° 33 F 12).						LE BRULIS (affl. n° 55 D 13).					
26 H	1,52	5,9	6,60	3,43	3,36	293 H	8,70	33,8	3,60	2,65	3,98
27 H	1,03	4,0	5,10	4,24	7,00	294 H	5,45	21,2	11,55	2,49	4,70
33 H	2,17	8,4	7,96	1,88	4,44	295 H	6,83	26,5	11,00	2,44	4,37
LES PERRIÈRES (affl. n° 38 F 8).						296 H	7,46	29,0	11,20	2,16	3,92
348 H	2,17	8,4	1,65	3,37	4,11	297 H	9,56	37,0	9,10	2,56	3,92
349 H	2,42	9,4	3,68	—	—	298 H	7,71	30,0	7,69	3,73	3,04
350 H	2,88	11,2	2,94	—	—	299 H	8,01	31,2	4,50	3,48	5,20
351 H	1,72	6,6	3,56	—	—	300 H	7,00	27,2	4,70	2,33	3,58
352 H	2,68	10,4	3,92	—	—	301 H	9,08	35,3	5,75	3,58	4,28
353 H	3,40	13,2	2,10	0,78	7,61	302 H	7,35	28,6	11,60	1,96	3,92
354 H	3,17	12,3	5,45	—	—	303 H	5,70	22,1	7,95	2,60	4,25
355 H	2,41	9,4	3,75	—	—	304 H	5,54	21,6	5,75	2,11	4,77
356 H	4,25	16,5	2,68	3,05	2,92	306 H	4,54	17,6	6,59	3,43	4,40
357 H	3,31	12,9	6,85	—	—	307 H	4,34	16,8	6,75	3,08	4,78
358 H	2,83	11,0	4,75	—	—	308 H	3,70	14,4	4,30	2,92	4,37
359 H	3,46	13,5	3,00	3,22	4,70	309 H	3,72	14,4	5,60	2,92	4,25
360 H	4,38	16,9	4,30	—	—	310 H	2,19	8,5	8,20	3,04	4,92
361 H	3,61	14,1	4,64	3,54	1,20	311 H	1,77	6,8	7,15	2,81	5,00
LA BUSSONNIÈRE (affl. n° 32 F 13).						312 H	1,00	3,8	6,80	2,92	4,44
369 H	2,65	10,3	4,13	—	—	313 H	3,04	11,9	11,62	3,26	3,80
370 H	1,83	7,1	3,30	2,22	3,50	314 H	2,40	9,2	13,00	2,33	4,63
371 H	2,62	10,3	5,55	—	—	315 H	2,62	10,1	7,05	2,33	3,10
372 H	2,50	9,7	4,54	—	—	316 H	5,86	22,7	20,00	1,88	5,47
LES CHAMPS GATS (affl. n° 35 F 12).						317 H	3,29	12,7	12,40	1,23	5,55
362 H	3,31	12,8	4,44	3,02	4,25	318 H	2,68	10,3	10,00	1,61	5,28
363 H	3,43	13,3	7,50	1,66	5,61	319 H	3,14	12,2	8,50	3,22	4,92
364 H	2,57	10,0	6,95	—	—	320 H	2,29	8,8	10,75	1,34	2,88
365 H	2,39	9,3	7,05	—	—	321 H	2,60	10,0	10,70	3,21	4,05
366 H	2,69	10,5	7,77	—	—	322 H	4,32	16,7	19,00	1,96	4,18
367 H	2,37	9,2	4,14	2,76	7,20	323 H	4,16	16,1	18,30	1,82	4,92
368 H	2,72	10,6	1,81	—	—	324 H	3,48	13,4	19,40	3,08	2,76
LA GOULLIÈRE (affl. n° 45 E 10).						325 H	4,04	15,7	15,00	1,71	4,40
22 H	0,54	2,1	4,80	—	—	326 H	2,84	11,0	20,10	1,88	3,86
23 H	2,13	8,3	9,85	—	—	327 H	4,48	17,4	14,65	1,05	2,49
24 H	0,22	0,9	4,40	0,99	1,25	328 H	4,15	16,1	28,06	0,18	5,46
25 H	0,28	1,1	10,50	—	—	329 H	3,02	11,7	15,40	1,58	5,20
LES EPINETTES (affl. n° 36 F 11).						330 H	3,49	13,4	24,00	1,15	4,70
29 H	0,43	1,7	4,71	3,37	3,50	331 H	3,29	12,8	34,20	1,61	3,36
30 H	0,50	1,9	5,85	—	—	334 H	4,80	18,6	26,15	0,27	5,71
31 H a	0,31	1,3	3,80	2,94	3,74	335 H	3,81	14,8	15,00	1,58	4,71
31 H b	0,54	2,1	5,50	1,87	4,17	LA GUICHARDIÈRE (affl. n° 43 E 13).					
						400 H	3,68	14,3	8,50	1,03	2,50
						401 H	3,79	14,6	5,20	—	—
						402 H	5,18	20,1	23,00	0,35	7,84
						403 H	6,68	26,0	37,80	0,29	6,76
						404 H	4,80	18,6	6,33	—	—
						405 H	4,52	17,5	6,35	—	—
						407 H	3,60	14,0	8,35	—	—
						408 H	4,06	15,8	10,20	—	—
						409 H	4,64	18,0	7,80	—	—
						410 H	3,75	14,5	9,40	—	—
						411 H	4,94	19,2	16,90	0,35	6,76

* U. 10⁻⁶. — Teneur en uranium déterminée par la méthode des plaques nucléaires (P. N.) et par fluorimétrie (F.).

$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %	$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %
LE VERDET (affl. n° 44 E 11).					586 H	5,78	22,4	7,85	—
491 H	3,15	12,2	7,06	—	587 H	6,29	24,4	7,40	—
GARAMBEAU (affl. n° 56 D 12).					588 H	3,92	15,2	8,65	—
417 H	4,64	18,0	10,12	4,02	LA PRIMAUDIÈRE (affl. n° 59 D 11).				
418 H	3,81	14,8	4,88	—	35 H	1,15	4,4	7,25	—
419 H	4,90	19,0	10,35	—	36 H	0,39	1,5	7,30	—
LA BERNARDAIS (affl. n° 58 D 12).					37 H	0,97	3,7	10,00	—
336 H	3,52	13,7	4,52	—	38 H	2,14	8,3	11,75	—
337 H	2,37	9,2	4,10	—	39 H	1,74	6,7	11,75	2,67
338 H	1,65	6,4	3,60	3,00	40 H	0,47	1,8	8,05	—
339 H	4,08	15,8	3,82	2,60	41 H	0,86	3,4	9,55	—
340 H	2,11	8,2	4,41	0,64	42 H	0,27	1,1	8,85	—
341 H	2,17	8,4	9,55	—	43 H	0,17	0,6	8,40	2,65
580 H	4,90	19,0	7,00	—	LE PRUSOT (affl. n° 60 D 10).				
581 H	7,43	28,9	6,50	—	578 H	2,11	8,1	8,80	—
582 H	5,83	22,6	7,40	—	579 H	2,44	9,4	10,70	—
583 H	6,66	25,9	8,10	—	LA BOUVARDIÈRE (affl. n° 66 C 10).				
584 H	6,35	24,7	8,40	—	34 H	0,29	1,1	5,42	—
585 H	4,72	18,3	10,00	—					

2. — LA PARTIE CENTRALE

LA FAVERIE (affl. n° 46 E 9).					LE MARROC (affl. n° 48 E 9).				
155 H	0,80	3,1	5,97	—	229 H	9,21	35,8	5,17	—
157 H	1,58	6,1	8,25	—	230 H	7,81	30,4	4,40	3,04
158 H	1,78	6,9	11,19	—	231 H	9,52	37,0	5,80	2,98
159 H	2,60	10,1	10,51	—	232 H	9,68	37,6	13,10	2,13
160 H	1,69	6,5	9,18	—	234 H	6,44	25,0	4,40	3,31
161 H	3,42	13,3	7,10	—	235 H	5,78	22,4	12,10	3,43
162 H	1,77	6,8	8,65	—	236 H	7,89	30,7	7,90	2,85
163 H	2,63	10,2	8,90	—	237 H	7,46	29,0	5,97	2,71
164 H	2,26	8,7	5,90	—	238 H	6,58	25,6	3,75	2,86
165 H	3,48	13,5	4,86	—	239 H	5,98	23,2	4,65	—
166 H	2,19	8,5	13,40	—	240 H	8,82	34,4	6,20	2,76
167 H	2,80	10,8	7,55	—	241 H	7,20	28,0	8,90	3,22
168 H	2,26	8,7	6,08	—	242 H	5,54	21,5	2,95	3,08
169 H	3,08	11,9	7,65	—	243 H	4,84	18,8	5,70	2,50
170 H	3,77	14,6	10,20	—	244 H	7,63	29,7	14,20	2,72
171 H	2,38	9,2	4,50	—	245 H	6,68	26,0	12,50	3,83
571 H	4,48	17,4	11,70	—	246 H	6,64	25,8	7,80	3,43
572 H	2,31	8,9	6,5	—	247 H	6,79	26,4	4,86	3,38
573 H	3,21	12,4	5,50	—	248 H	6,92	26,9	4,15	3,77
574 H	3,56	13,8	18,7	—	249 H	7,06	27,4	4,44	2,76
575 H	3,36	13,0	7,75	—	250 H	7,62	29,6	4,42	3,48
576 H	3,90	15,1	7,5	—	251 H	6,51	25,3	4,04	2,60
577 H	4,14	16,1	12,0	—	252 H	5,00	19,4	5,15	3,22
LA BELLE-VUE (VIGNEUX) (affl. n° 47 E 9).					253 H	7,29	28,3	5,00	0,85
281 H	8,62	33,5	7,70	—	254 H	7,56	29,4	4,80	1,82
282 H	9,26	36,0	4,80	—	255 H	5,88	22,8	12,90	2,92
283 H	8,76	34,0	5,00	—	256 H	4,03	15,6	6,18	2,85
284 H	9,83	38,2	6,78	—	257 H	4,08	15,8	7,80	3,08
285 H	6,16	23,9	2,88	—	258 H	4,31	16,7	4,60	1,58
286 H	5,30	20,6	4,00	—	259 H	8,62	33,5	4,62	3,08
287 H	7,21	28,0	2,30	—	550 H	3,87	15,0	6,35	—
288 H	7,93	30,8	3,65	—	551 H	2,83	11,0	6,75	—

	$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %		$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %
552 H	3,53	13,7	4,85	—	—	269 H	10,40	40,4	3,40	—	—
553 H	2,64	10,2	6,00	—	—	270 H	9,76	37,9	2,50	3,54	3,10
554 H	5,73	22,3	16,10	—	—	MALESCOT (affl. n° 61 D 9).					
555 H	2,49	9,6	6,75	—	—	271 H	11,82	46,0	6,87	2,71	3,98
556 H	2,24	8,7	4,00	—	—	272 H	11,32	44,0	9,54	2,66	4,18
557 H	6,04	23,5	23,20	—	—	273 H	11,40	44,3	6,25	3,22	3,74
558 H	4,12	16,0	6,40	—	—	274 H	10,25	39,8	6,45	—	—
559 H	3,62	14,0	7,60	—	—	275 H	11,50	44,7	6,05	1,15	2,09
605 H	15,10	109,3	98,00	—	—	276 H	10,20	39,7	3,75	—	—
608 H	10,30	74,5	65,00	—	—	277 H	10,62	41,3	1,33	—	—
LA BABINIÈRE (affl. n° 49 E 8).						278 H	10,37	40,3	2,29	—	—
261 H	5,84	22,7	4,80	—	—	279 H	9,98	38,8	4,63	2,24	5,06
263 H	8,25	32,1	2,20	—	—	280 H	9,93	38,6	1,97	—	—
264 H	8,93	34,7	3,50	2,56	5,54	VIGNEUX (affl. n° 67 C 8).					
LA ROCHE (affl. n° 63 D 8).						289 H	9,66	37,6	4,23	—	—
266 H	7,24	28,1	0,89	—	—	290 H	7,36	28,6	6,55	2,38	3,50
267 H	9,62	37,4	1,41	2,33	4,64	291 H	6,60	25,6	11,66	—	—
268 H	8,78	34,1	3,00	—	—	292 H	7,61	29,6	7,30	3,22	4,25

3. — LA PARTIE OUEST

LA BILLAIS DENIAUD (affl. n° 64 D 7).						450 H	1,80	7,0	11,10	4,88	7,00
394 H	3,72	14,4	7,77	—	—	451 H	2,58	10,0	10,80	—	—
395 H	4,29	16,6	6,39	2,76	2,73	452 H	3,23	12,5	8,75	—	—
396 H	5,06	19,6	8,53	—	—	453 H	1,91	7,4	9,00	2,11	4,10
397 H	3,94	15,3	3,21	—	—	454 H	2,64	10,2	7,75	—	—
LA PLAISSANCE (affl. nos 68, 69, 70 C 6).						455 H	4,10	15,9	12,00	1,67	4,28
443 H	3,52	13,7	10,20	—	—	456 H	2,63	10,2	7,30	—	—
444 H	3,24	12,6	14,30	3,36	5,68	457 H	4,26	16,5	3,98	—	—
446 H	3,03	11,7	17,90	—	—	458 H	5,09	19,8	3,98	—	—
447 H	2,90	11,2	14,30	—	—	LES HAIES (affl. n° 71 C 6).					
448 H	4,84	18,8	14,80	3,61	7,20	459 H	5,30	20,6	5,00	3,08	5,00
449 H	4,21	16,3	6,20	—	—	460 H	3,03	11,7	8,45	—	—
						461 H	2,48	9,6	6,25	—	—

II. — GRANITE DE LA BANDE POINTE DU RAZ - NANTES

LA CONTRIE (affl. n° 2 I 13).						BAS VILLAGE (affl. n° 10 H 12).					
17 H	0,72	2,8	10,50	—	—	71 H	3,08	11,9	7,35	0,44	0,31
18 H	0,98	3,8	7,40	—	—	72 H	2,26	8,7	7,10	1,29	1,99
20 H	1,23	4,7	9,60	—	—	73 H	1,92	7,4	8,20	—	—
21 H	0,74	2,8	6,55	—	—	74 H	1,43	5,5	6,05	—	—
LA PELLERIE (affl. n° 3 I 12).						75 H	1,77	6,8	9,40	2,44	4,37
82 H	1,36	5,2	7,75	2,94	4,41	76 H	2,23	8,6	6,75	2,98	4,40
83 H	1,36	5,2	6,00	—	—	77 H	1,26	4,9	6,10	—	—
84 H	0,85	3,3	0,00	—	—	78 H	1,85	7,2	6,00	—	—
85 H	0,88	3,4	6,30	—	—	79 H	1,90	7,3	7,95	—	—
86 H	1,46	5,6	6,00	—	—	80 H	1,08	4,2	6,25	—	—
87 H	1,03	4,0	0,00	—	—	81 H	1,80	7,0	6,60	—	—
88 H	1,22	4,7	9,50	—	—	485 H	3,35	13,0	8,75	—	—
89 H	1,62	6,3	2,50	—	—	486 H	3,38	13,1	7,30	—	—
90 H	1,82	7,0	7,50	—	—	487 H	3,86	15,0	9,00	—	—
91 H	1,35	5,2	7,75	—	—	488 H	4,01	15,6	7,00	—	—
						489 H	2,98	11,5	13,40	—	—
						490 H	1,91	7,4	7,65	—	—

	$\alpha/cm^2/s$	U. 10^{-6} (P.N.)	U. 10^{-6} (F.)	Na ₂ O %	K ₂ O %
RIVAUDIÈRE (affl. n° 4 I 11).					
12 H	0,70	2,7	5,50	2,54	4,35
13 H	1,41	5,4	5,58	1,87	4,05
14 H	0,90	3,5	8,35	—	—
15 H	1,20	4,6	5,40	2,49	7,36
17 H	0,70	2,7	6,30	2,43	5,54

LA LAINERIE (affl. n° 12 H 11).

482 H	5,24	20,3	5,70	—	—
483 H	8,50	33,0	7,05	—	—
484 H	4,88	18,9	9,65	—	—

LE FUY (affl. n° 25 G 10).

60 H	0,90	3,5	7,32	—	—
61 H	0,60	2,3	5,40	—	—
62 H	0,75	2,9	5,95	1,71	3,36
63 H	0,50	1,9	5,42	—	—
64 H	0,78	3,0	5,78	—	—

FOSSÉ-NEUF (affl. n° 13 H 10).

44 H	0,47	1,8	6,25	2,02	6,47
45 H	0,79	3,0	9,60	—	—
46 H	2,13	8,2	6,25	2,12	5,18
47 H	0,98	3,8	8,70	—	—
48 H	1,12	4,3	9,55	—	—
49 H	1,00	3,8	0,00	—	—
50 H	0,42	1,6	8,55	2,82	4,25
51 H	0,98	3,8	5,00	—	—
52 H	1,23	4,7	5,75	—	—

BOIS-DAVID (affl. n° 14 H 10).

53 H	1,35	5,2	5,80	2,76	4,40
54 H	0,92	3,5	0,00	—	—
55 H	1,14	4,4	7,50	2,49	7,47
56 H	1,44	5,6	9,60	—	—
57 H	0,98	3,8	5,70	2,56	4,56
58 H	1,21	4,7	7,80	—	—
59 H	1,30	5,0	9,00	2,51	5,80

SAINT-SAVIN (affl. n°s 28 G 9, 29 G 9, 30 G 8, 37 F 8, 38 F 8 et 39 F 7).

501 H	2,20	8,5	4,85	1,53	2,76
503 H	2,52	9,8	7,70	—	—
504 H	1,40	5,4	7,90	1,88	3,67
505 H	1,91	7,4	6,85	—	—
506 H	1,37	5,3	11,60	—	—
507 H	1,91	7,4	7,95	—	—
508 H	2,48	8,4	10,50	—	—
509 H	1,55	6,0	4,70	—	—
510 H	0,97	3,7	5,05	1,77	4,77
511 H	1,75	6,8	7,80	—	—
512 H	1,30	5,0	5,75	—	—
513 H	2,12	8,2	8,25	2,82	4,70
514 H	1,28	4,9	6,50	2,71	4,70
515 H	3,18	12,3	4,40	—	—

SAUTRON (affl. n° 26 G 10).

398 H	4,15	16,1	6,15	2,29	2,21
399 H	3,64	14,1	2,00	—	—

	$\alpha/cm^2/s$	U. 10^{-6} (P.N.)	U. 10^{-6} (F.)	Na ₂ O %	K ₂ O %
LE TERTRE (affl. n° 27 G 10).					
65 H	0,61	2,3	3,90	3,14	6,00
66 H	0,71	2,7	5,20	1,45	3,86
67 H	1,93	7,5	3,39	2,18	4,70
68 H	1,00	3,8	5,07	—	—
69 H	0,87	3,3	5,30	—	—
70 H	2,80	10,8	6,55	2,98	4,56

SAINT-ETIENNE - SAINT-SAVIN (affl. n° 40 F 7).

597 H	3,79	14,7	4,55	—	—
-------	------	------	------	---	---

LES MOULINS (affl. n° 50 F 7).

437 H	2,56	9,9	6,90	—	—
438 H	2,60	10,1	4,05	—	—
439 H	2,09	8,1	2,34	—	—
440 H	2,51	9,7	7,00	1,62	4,40
441 H	4,40	17,1	6,05	1,82	4,92
442 H	5,08	19,7	2,92	2,24	5,75

CARRIÈRES DES BOIS DES BONNES-DAMES (SAINT-ETIENNE) (affl. n° 52 E 6).

424 H	1,46	5,6	13,20	3,54	5,47
425 H	2,46	9,5	7,20	3,08	4,56
426 H	1,83	7,1	0,50	—	—
427 H	3,14	12,2	11,70	3,04	4,71
428 H	2,26	8,7	11,60	—	—
429 H	2,58	10,0	8,90	—	—
430 H	1,97	7,6	6,60	3,22	4,63
431 H	1,20	4,6	7,35	—	—
432 H	1,29	5,0	10,20	3,04	4,45
434 H	1,78	6,9	2,20	—	—
435 H	1,91	7,4	14,60	—	—
436 H	3,37	13,1	3,78	2,82	4,44

LA PETITE HAIE (affl. n° 53 E 6).

468 H	4,82	18,7	—	—	—
469 H	5,88	22,8	12,20	—	—
470 H	4,18	16,2	4,16	—	—
471 H	2,72	10,5	7,50	—	—
472 H	8,50	33,0	14,10	2,82	4,92
473 H	9,45	36,7	7,50	2,13	3,92
474 H	6,77	26,3	5,20	2,13	4,40
475 H	7,76	30,2	10,30	1,53	2,98
476 H	5,95	23,1	4,11	2,60	5,32
477 H	4,41	17,1	1,17	—	—

BELLE-VUE (SAINT-ETIENNE, affl. n° 54 E 6).

478 H	4,03	15,6	8,85	2,33	4,40
479 H	3,30	12,8	3,12	—	—
480 H	5,67	22,0	7,80	2,82	4,63
481 H	5,42	21,0	7,25	5,04	9,02

LA HAIE MÉRIAIS (affl. n° 65 D 5).

609 H	1,68	6,5	6,55	—	—
-------	------	-----	------	---	---

	$\alpha/cm^2/s$	U. 10^{-6} (P.N.)	U. 10^{-6} (F.)	Na ₂ O %	K ₂ O %
LA GUAY (affl. n° 73 C 4).					
516 H	3,32	12,9	6,30	3,04	4,56
517 H	3,22	12,5	6,50	—	—
518 H	3,09	12,0	3,68	—	—
519 H	2,63	10,2	7,60	2,76	4,77
520 H	1,34	5,2	4,80	2,56	3,92
521 H	1,60	6,2	4,50	—	—
522 H	1,82	7,0	5,85	—	—
523 H	2,22	8,6	17,50	—	—
LE PRÉVOT (affl. n° 74 C 3).					
592 H	4,34	16,8	4,85	—	—
593 H	2,63	10,2	7,85	—	—

	$\alpha/cm^2/s$	U. 10^{-6} (P.N.)	U. 10^{-6} (F.)	Na ₂ O %	K ₂ O %
LA NOË (affl. n° 75 C 3).					
594 H	4,23	16,4	4,30	—	—
LA TOUCHE (affl. n° 77 et 78 B 3).					
529 H	2,60	10,1	8,30	—	—
530 H	2,17	8,4	3,56	—	—
531 H	3,02	11,7	6,10	—	—
532 H	3,34	13,0	8,45	—	—
533 H	6,24	24,2	24,80	1,23	5,32
534 H	4,00	15,5	8,55	—	—
589 H	3,70	14,4	5,50	—	—
591 H	3,75	14,5	4,70	—	—

III. — LES GRANITES GNEISSIQUES

LA POMPIÈRE (affl. n° 1 J 12).					
125 H	2,00	7,7	7,65	2,82	5,55
128 H	2,62	16,1	6,87	3,66	5,61
LA GATINE (affl. n° 5 I 11).					
92 H	2,50	9,7	7,35	2,76	4,44
94 H	1,27	4,9	9,50	3,54	3,86
99 H	3,35	13,0	19,60	2,60	3,80
100 H	2,70	10,5	9,80	—	—
102 H	2,60	10,1	7,50	2,45	4,82
106 H	3,55	13,8	5,47	2,98	3,57
109 H	3,44	13,3	4,39	—	—
112 H	4,46	17,3	10,40	2,98	5,06
114 H	2,03	7,9	14,56	3,38	4,37
COUËRON (affl. n° 7 I 9).					
492 H	3,57	13,8	6,90	—	—
493 H	3,88	15,1	4,40	—	—
494 H	3,28	12,7	5,15	—	—
495 H	3,37	13,1	3,65	—	—
496 H	2,34	9,0	7,25	—	—
497 H	3,86	15,0	7,10	—	—
498 H	3,02	11,7	6,85	—	—
499 H	4,40	17,1	2,35	—	—
500 H	3,17	12,3	6,30	—	—
BOUILLON (affl. n° 6 I 9).					
203 H	5,08	19,7	9,00	—	—
204 H	5,48	21,3	5,30	3,73	3,86
206 H	6,82	26,5	13,90	3,00	5,17
207 H	9,95	38,7	2,66	2,18	4,56
208 H	8,72	33,9	8,06	—	—
209 H	7,87	30,6	4,85	4,95	2,16
210 H	9,21	35,8	4,25	3,68	2,68

LES DAUDIÈRES (affl. n° 16 H 8).					
178 H	2,17	8,4	0,42	5,35	4,56
181 H	2,05	7,9	3,56	3,62	4,70
182 H	2,92	11,3	9,60	—	—
184 H	4,10	15,9	7,70	—	—
185 H	5,54	21,5	9,20	3,54	5,81
186 H	2,92	11,3	6,16	—	—
187 H	1,17	4,5	2,78	3,31	4,63
188 H	3,08	11,9	12,62	—	—
189 H	3,50	13,6	9,40	—	—
190 H	8,48	33,0	14,38	3,96	3,74
192 H	4,82	18,7	5,05	3,27	4,44
193 H	4,82	18,7	6,03	3,04	2,26
194 H	5,58	21,7	4,56	—	—
LA ROCHE GUILLÈRE (affl. n° 17 H 8).					
195 H	5,08	19,7	3,20	—	—
197 H	8,05	31,3	8,82	2,70	3,86
199 H	4,92	19,1	6,40	—	—
200 H	4,78	18,6	6,20	3,54	3,92
L'ETANG BERNARD (affl. n° 18 H 7).					
600 H	3,13	12,1	2,31	—	—
601 H	3,93	15,2	4,05	—	—
602 H	3,24	12,6	3,80	—	—
603 H	3,96	15,4	3,50	—	—
604 H	2,56	9,9	2,80	—	—
LE CARREFOUR (affl. n° 31 G 6).					
606 H	3,36	13,0	2,00	—	—
LA GIQUELAIE (affl. n° 41 F 5).					
598 H	2,90	11,2	3,80	—	—
599 H	2,79	10,8	2,00	—	—

IV. — LES ROCHES METAMORPHIQUES

1. — LES MICASCHISTES

	$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %		$\alpha/cm^2/s$	$U. 10^{-6}$ (P. N.)	$U. 10^{-6}$ (F.)	Na_2O %	K_2O %
LA JONNELLIÈRE (affl. n° 19 G 16 et 20 G 15).						223 H	5,93	23,0	2,29	1,34	6,71
373 H	2,02	7,8	1,90	2,33	2,39	225 H	6,80	26,4	2,96	2,56	0,94
374 H	2,70	10,5	2,58	—	—	226 H	6,40	24,9	2,57	2,38	6,00
375 H	3,30	12,8	3,32	0,94	5,28	227 H	6,78	26,3	4,58	1,58	4,17
376 H	2,16	8,4	2,37	3,38	1,48	228 H	5,14	20,0	2,14	2,22	2,55
377 H	2,84	11,0	1,72	—	—	BELLE-VUE (PONT DU CENS) (affl. n° 21 G 13).					
378 H	2,92	11,3	4,92	—	—	147 H	0,69	2,6	1,61	1,53	4,40
379 H	2,77	10,7	5,75	—	—	148 H	1,51	5,8	3,86	1,53	5,40
380 H	3,17	12,3	2,00	—	—	LA CORNICHE (affl. n° 22 G 13).					
381 H	2,52	9,8	2,22	—	—	133 H	2,04	7,9	3,75	1,88	6,00
384 H	3,56	13,8	3,30	2,54	1,43	135 H	2,43	9,4	2,32	2,08	2,16
385 H	2,78	10,8	2,10	—	—	LA CHOLLIÈRE (affl. n° 23 G 13).					
386 H	3,52	13,7	2,27	—	—	136 H	0,92	3,5	3,00	—	—
387 H	3,81	14,8	2,50	2,24	2,62	139 H	1,28	4,9	3,90	—	—
388 H	3,78	14,7	2,00	—	—	CARRIÈRE DU TAILLIS (affl. n° 24 G 11).					
389 H	3,60	14,0	2,25	—	—	1 H	1,25	4,8	6,00	0,83	4,77
390 H	4,11	15,9	2,00	—	—	2 H	1,09	4,2	4,66	—	—
391 H	3,09	12,0	1,30	—	—	3 H	1,45	5,6	2,50	2,33	2,24
392 H	4,02	15,6	2,00	—	—	4 H	0,78	3,0	4,87	—	—
393 H	3,48	13,5	2,10	—	—	5 H	1,15	4,4	2,30	—	—
PONT DU CENS (affl. n° 8 H 14).						6 H	0,69	2,6	3,25	0,35	0,55
212 H	8,98	34,9	3,68	3,88	3,60	7 H	1,10	4,2	4,50	—	—
213 H	9,00	35,0	1,95	2,85	4,44	8 H	0,51	1,9	3,50	—	—
214 H	8,30	32,3	4,16	1,34	5,06	10 H	2,22	8,6	4,85	—	—
215 H	8,38	32,6	4,86	2,29	5,80	11 H	1,40	5,4	1,65	—	—
216 H	8,40	32,6	3,06	2,60	2,92	LES EPINETTES (affl. n° 36 F 11).					
217 H	10,08	39,2	2,22	3,67	1,66	28 H	1,77	6,8	3,40	—	—
218 H	7,32	28,4	3,58	1,66	6,71						
219 H	8,23	32,3	2,80	2,38	3,26						
220 H	6,00	23,3	0,44	0,83	0,84						
221 H	6,35	24,7	3,70	2,01	2,38						
222 H	7,84	30,5	2,85	0,83	2,54						

2. — LES AMPHIBOLITES

BOIS GARO (affl. n° 11 H 11).						LA PETITE HAIE (affl. n° 51 E 7).					
172 H	1,00	3,8	2,50	0,99	1,44	464 H	2,60	10,1	0,97	—	—
174 H	0,62	2,4	2,01	—	—	466 H	3,79	14,7	0,45	—	—
177 H	0,80	3,1	9,89	—	—	467 H	5,34	20,7	0,83	—	—

BIBLIOGRAPHIE

- AYAN M. (1959). — Contribution à l'étude pétrographique et géologique de la région située au Nord-Est de Kaman (Turquie). Thèse, Nancy.
- BARET C. (1876). — Note sur les micas : Micas primitif d'Orvault. *Ann. Soc. Acad., Nantes*, 5^e série, VI, pp. 233-236, 1 pl.
- BARET C. (1878). — Minéraux normaux du département de la Loire-Inférieure. *Ann. Soc. Acad., de Nantes*, 5^e série, VIII, pp. 180-183.
- BARET C. (1878). — Tourmalines bleues, vertes et roses dans un filon de pegmatite du granite d'Orvault. *Bull. Soc. Min. Fr.*, I, p. 94.
- BARET C. (1884). — Sur la présence de l'uraninite dans les pegmatites d'Orvault (Loire-Inférieure). *Bull. Soc. Minér. Fr.*, vol. VII, p. 460.
- BARET C. (1898). — Minéralogie de la Loire-Inférieure. *Bull. Soc. Nat. Ouest*, t. 8, fasc. II, 175 p., 19 pl.
- BARROIS C. (1884). — Observations sur la constitution géologique de la Bretagne. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XI, pp. 87-91 et pp. 278-285.
- BARROIS C. (1888). — Sur la constitution géologique de l'Ouest de la Bretagne. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XVI, pp. 1-11.
- BARROIS C. (1896). — Légende de la feuille de Saint-Nazaire. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XXIV, pp. 137-160.
- BARROIS C. (1897). — Des divisions géographiques de la Bretagne. *Ann. de Géographie*, VI, pp. 23-44.
- BARROIS C. (1910). — Sur les relations tectoniques des granites grenus et gneissiques de Bretagne. *C.R. XI^e Cong. géol. Int. Stockolm*, pp. 597-605.
- BARROIS C. (1930). — Le sillon de Bretagne. *Ann. Soc. géol. Nord*, LV, pp. 147-156.
- BARROIS C. (1932). — Feuille de Nantes au 1/320.000^e (en collaboration avec G. MATHIEU et G. WATERLOT). *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, 36 (187), pp. 34-43.
- BERTRAND L. (1946). — Histoire géologique du sol français. Flammarion, Paris.
- BUREAU L. (1900). — Notice sur la géologie de Loire-Inférieure. « Nantes et la Loire-Inférieure », III, pp. 99-522, 63 fig., 2 pl.
- BUREAU L. (1910). — Feuille de Nantes au 1/80.000^e. *Bull. Carte géol. Fr.*, XX, n° 126, pp. 9-11.
- BRIÈRE Y. (1920). — Les écloïtes françaises. *Bull. Soc. Fr. Min.*, XLIII, pp. 72-222.
- CAROLL D. (1953). — Weatherability of zircon. *Jour. Sed. Petr.*, vol. 23, pp. 106-116.
- COGNÉ J. (1953). — Schistes cristallins et granites en Bretagne méridionale : l'anticlinal de Cornouaille. *Bull. Soc. géol. Fr.* (6), III, pp. 785-806.
- COGNÉ J. (1957). — Schistes cristallins et granites en Bretagne méridionale : le domaine de l'anticlinal de Cornouaille. Thèse, Strasbourg.

- COPPENS R. (1948). — Sur la disparition de l'image latente dans la photographie des trajectoires des particules alpha. *C.R. Ac. Sci.*, t. 227, pp. 61-63.
- COPPENS R. (1949). — Sur l'activité des inclusions radioactives contenues dans les roches éruptives. *C.R. Ac. Sci.*, t. 228, p. 176.
- COPPENS R. (1949). — Sur la répartition des minéraux radioactifs dans un granite. *C.R. Ac. Sci.*, t. 228, p. 1218.
- COPPENS R. (1949). — Sur une nouvelle espèce d'inclusion radioactive contenue dans un granite. *C.R. Ac. Sci.*, t. 228, p. 1938.
- COPPENS R. (1949). — Sur une inclusion radioactive à forte teneur en uranium et en thorium dans un granite. *C.R. Ac. Sci.*, t. 229, p. 617.
- COPPENS R. (1949). — Inclusions à faible teneur en uranium contenues dans un granite. *C.R. Ac. Sci.*, t. 229, p. 1221.
- COPPENS R. et COPPENS A. (1950). — Application de la plaque « nucléaire » à l'étude de la radioactivité d'un massif rocheux. Répartition de la radioactivité dans une partie d'un massif granitique situé au Nord de Vannes (Morbihan). *Bull. Soc. Scientifique de Bretagne*, t. 75.
- COPPENS R. (1950). — Etude de la radioactivité de quelques roches par l'émulsion photographique. Thèse, Paris. Masson, édité. *Bull. Soc. Minér. et Cristall.*, t. 73, pp. 217-321.
- COPPENS R. (1950). — Sur l'emploi de l'émulsion photographique pour la détermination de la radioactivité des roches par l'examen des trajectoires des particules alpha. *Jour. de Phys.*, t. 2, p. 21.
- COPPENS R. (1950). — Sur l'activité de petits cristaux à halos pléochroïques contenus dans un granite. *C.R. Ac. Sci.*, t. 231, pp. 343-345.
- COPPENS R. (1951). — Sur l'utilisation des émulsions photographiques dites « pour recherches nucléaires » pour l'examen microradiographique des roches et l'étude des inclusions radioactives. *C.R. Ac. Sci.*, t. 232, p. 724.
- COPPENS R. (1952). — Détermination expérimentale du coefficient d'absorption des rayons alpha d'un corps de composition chimique inconnue et recherche de la teneur en uranium et en thorium d'un corps radioactif par autoradiographie. *C.R. Ac. Sci.*, t. 234, pp. 1974-1976.
- COPPENS R. (1952). — Sur la teneur en thorium d'une allanite. *Bull. Soc. Minér. et Cristall.*, t. 75, pp. 59-62.
- COPPENS R. et COPPENS Y. (1956). — Sur la radioactivité des « coquins » phosphatés des sables verts albiens de la carrière du plateau de Vassincourt (Meuse). *C.R. Ac. Sci.*, t. 243, pp. 1046-1048.
- COPPENS R. et JURAIN G. (1957). — Répartition de la radioactivité dans un granite voisin d'un gisement uranifère. *Bull. Soc. Minér. Cristall.*, t. LXXX, pp. 95-96.
- COPPENS R. (1958). — L'utilisation de la plaque photographique « nucléaire » pour l'étude de la radioactivité des roches. *Industries Atomiques* n° 1-2, pp. 43-51.
- CORK J. M. (1949). — Radioactivité et Physique Nucléaire. Dunod, Paris.
- COULOMB R., GOLDSTEIN (M.) et LE MERCIER M. (1956). — Etude de la répartition statistique de l'uranium et de ses accompagnateurs dans les granites. Contribution à la prospection géochimique des grands massifs. *C.R. XX^e Cong. géol. Intern., Mexico*, p. 360.
- CURIE I. (1946). — Sur la possibilité d'étudier l'activité des roches par l'observation des trajectoires des rayons alpha dans l'émulsion photographique. *J. Phys. Radium* (8), 7, p. 313-319.
- DAVIDSON C. F. (1951). — The distribution of Radioactivity. *Mining Mag.*, 85, pp. 325-340.
- DAVIDSON C. F. (1959). — Radiogeology in Russia. *The Mining Mag.*, November 1957, pp. 3-11.

- EVANS R. D. (1934). — The measurement of natural alpha particles ejected from solids. *Phys. Rev.*, vol. 45, pp. 29-37.
- EVANS R. D. et GOODMAN C. (1947). Radioactivity of rocks. *Bull. Geol. Soc. America*, 52, pp. 459-490.
- FAUL H. (1954). — Nuclear Geology. A Symposium on nuclear phenomena in the Earth Science. Wiley, New-York and London.
- FORD I. H. (1951). — Radioactivity of rocks. An improvement in the photographic technique. *Nature*, 167, pp. 273-274.
- GIOT P. R. et COGNÉ J. (1948). — A propos des relations des granites et des « granulites » en Cornouaille bretonne. *C. R. S. Soc. Géol. Fr.*, pp. 296-297.
- HAMILTON E. (1958). — Distribution of radioactivity in rocks and minerals, and the effect of weathering on determinations of uranium. *Nature*, vol. 181, pp. 697-698.
- HARKER A. (1932). — Metamorphism: a study of the transformations of rock masses. *Methuen, London*.
- HARVEY C. E. (1950). — Spectrochemical procedures. *Applied Research Laboratories*, Glendale, Calif.
- HATUDA Z. (1952). — A new method of radioactive exploration using nuclear emulsions and comparison with other methods. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, series B, vol. XX, n° 2, pp. 89-93.
- HAYASE I. (1953). — The radiactivity of rocks and minerals studied with nuclear emulsion. - I. The minute radioactive minerals of the Tonakamaiyama and Mikumo granites, Siga Pref., Japan. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, series B, vol. XX, n° 4, pp. 247-260.
- HAYASE I. (1954). — The radioactivity of rocks and minerals studies with nuclear emulsion. II. Thorium content of granites allanites. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, série B, vol. XX, n° 2, pp. 171-182.
- HAYASE I. (1955). — The radioactivity of rocks and minerals studied with nuclear emulsion. III. Radioactivity of biotite of the Tanakomiyama granite, Siga Pref., Japan. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, série B, vol. XXII, n° 2, pp. 177-184.
- HAYASE I. (1956). — The radioactivity of rocks and minerals studied with nuclear emulsion. IV. Thorium uranium ratio measurement of the minute microscopic minerals by the photographic emulsion method. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, séries B, vol. XXIII, n° 2, pp. 255-274.
- HÉE A., COCHE A., JAROVY M. et KRAEMER R. (1957). — Détermination de l'âge absolu de deux granites de la chaîne des Vosges. *Ann. de Géophys.*, t. 13, n° 2, pp. 135-152.
- HUSSEIN H. A. M. (1957). — Sur la présence d'une minéralisation uranifère dans deux carrières de la région de Vigneux (Loire-Atlantique) (en collaboration avec COPPENS R.). *C. R. Ac. Sci.*, t. 245, pp. 1818-1820.
- HUSSEIN H. A. M. (1958). — Etude sur quelques phosphates égyptiens. Teneur en phosphate et radioactivité. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 6^e série, t. VIII, pp. 289-294.
- HUTTON C. O. (1947). — The nuclei of pleochroic halos. *Amer. Jour Sci.*, vol. 245, pp. 154-156.
- JOURDY E. (1909). — Le sillon de Bretagne. *Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest* (2), IX, pp. 1671, 14 fig., 13 pl.
- JURAIN G. (1955). — Sur la teneur en uranium d'eaux thermales du Sud des Vosges. *C. R. Ac. Sci.*, t. 241, pp. 1482-1485.
- JURAIN G. (1956). — Présence d'uranium dans les nodules phosphatés du Lias moyen des Vosges. *C. R. Ac. Sci.*, t. 242, pp. 1748-1750.

- JURAIN G. (1957). — Répartition de la radioactivité dans un granite voisin d'un gisement uranifère. *Bull. Soc. Fr. Minér. Cristall.*, LXXX, pp. 95-96.
- JURAIN G. (1957). — Origine probablement hydrothermales d'une localisation actuelle d'uranium dans les Vosges méridionales. *Cong. des Sociétés Savantes, Bordeaux*.
- JURAIN G. et MAILLOT J. P. (1958). — Dosage radiométrique rapide de l'uranium et du thorium dans les minerais complexes. *Jour. Phys. Radium*, t. 19, suppl. n° 4, pp. 35 A-38 A.
- KAPLAN G. (1958). — Sur la présence d'un phosphate d'uranyle dans une granulite de Bretagne. *C. R. Ac. Sci.*, t. 246, pp. 1066-1068.
- KAPLAN G. (1958). — Introduction à l'étude de la géochimie de l'uranium dans les roches altérées du massif de Rostrenan. Thèse, Nancy.
- KARKHANAVALA M. D. (1958). — On radioactive uraniferous iron oxides. *Géochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 15, n° 15, pp. 229-236.
- KEEVIL N. B. (1944). — Thorium uranium ratios in rocks and minerals. *Amer. Jour. Sci.*, vol. 242, pp. 209-321.
- KERR P. F. (1956). — Les phénomènes d'altération des roches en étant que guides dans la recherche de l'uranium. *Actes de la Conf. Inter. de Genève*, vol. 6, pp. 780-786.
- LACROIX A. (1889). — Contributions à l'étude des gneiss à pyroxène et roches à verneïtes. *Bull. Soc. Fr. Minér.*, XII, pp. 83-360.
- LACROIX A. (1891). — Etude pétrographique des élogites de la Loire-Inférieure. *Bull. Soc. Sci. Nat. Ouest*, 1, pp. 81-114.
- LACROIX A. (1893-1913). — Minéralogie de la France et ses colonies. Baudry-Béranger, Paris, T. I à V.
- LAFITTE P. (1957). — Introduction à l'étude des roches métamorphiques et des gîtes métallifères. Masson, Paris.
- LAPADU-HARGUES P. (1953). — Sur la composition chimique moyenne des amphibolites. *Bull. Soc. géol. Fr.* (6), III, pp. 153-174.
- LAPADU-HARGUES P. (1958). — Observations à propos des amphibolites. *C. R. Bull. Soc. géol. Fr.*, (6), pp. 132-133.
- LARSEN E. S., and KEEVIL N. B. (1942). — The distribution of helium and Radioactivity in rocks. III. Radioactivity and Petrology of some California intrusions. *Amer. Jour. Sci.*, t. 240, pp. 204-215.
- LARSEN E. S. (1953). — Distribution of uranium in igneous complexes, in geological investigations of radioactive deposits. *Semiannual Progress Report, U.S. Geological Survey, T.E.I.* 390, *U.S. Atomic Energy Commission Technical Information Service*, pp. 240-244.
- LARSEN E. S., WARING C. L., and BERMAN J. (1953). — Zoned zircon from Oklahoma. *Amer. Mineral*, 38, pp. 1118-1125.
- LARSEN E. S., and PHAIR G. (1954). — The distribution of uranium and thorium in igneous rocks, *Nuclear Geology*, John Wiley Sons, New-York.
- LOVERING T. S., CARMY F. C., LAKIN H. W. et WORD F. N. (1956). — L'utilisation des techniques et des méthodes de la géochimie dans la prospection de l'uranium. *Conf. Inter. de l'Energie Atomique de Genève*, pp. 896-903.
- MATHIEU G. (1944). — Essai sur les granites du Massif Armoricaïn. *Rev. Scient.*, Janv. 1944, pp. 15-24.
- MAURICE O. D. (1949). — Transport and Deposition of the non sulphide minerals, Vanadium and Zirconium minerals. *Econ. Geol.*, vol. 44, pp. 721-731.

- MERLIN O. H., PICCIOTTO E. et WILGAIN S. (1957). — Etude photographique de la distribution de la radioactivité dans le granodiorite d'Adamello. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 11, n° 3, pp. 171-188.
- NICHOLS E. L. and SLATTERY (1926). — Uranium as an activator. *Optical Soc. Amer. Journ.*, vol. 14, p. 449.
- PENEAU J. (1932). — Observations sur le Dévonien et le Dinatien du pli d'Ancenis (Loire-Inférieure). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), 11, pp. 615-621.
- PERRIN R. et ROUBAULT M. (1946). — Note sur le mécanisme du métamorphisme. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), XVI, pp. 155-168.
- PERRIN R. et ROUBAULT M. (1947). — Relation des granites, granulites et roches amphiboliques de la côte de Benodet (Finistère). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), XVII, pp. 233-248.
- PERRIN R. et ROUBAULT M. (1951). — La révolution moderne des idées en pétrographie. *Rev. Scient.* n° 3310, pp. 101-109.
- PERRIN R. et ROUBAULT M. et SADLAN G. (1956). — Echanges chimiques dans un cas précis de « Magmatic Stopping » à Saint-Jean-du-Doigt (Bretagne). *C.R. XX^e Cong. géol. Inter. Mexico*, p. 144.
- PICCIOTTO E. (1949). — L'étude de la radioactivité des roches par la méthode photographique. *Bull. Soc. Belge géol. Paléont. et Hydrol.*, vol. 58, pp. 75-90.
- PICCIOTTO E. (1950). — Distribution de la radioactivité dans les roches éruptives. *Bull. Soc. Belge géol. Paléont. et Hydrol.*, n° 59, pp. 170-198.
- PICCIOTTO E. (1952). — Distribution de la radioactivité dans les roches éruptives. *Bull. Soc. Belge géol. Paléont. et Hydrol.*, t. LXI, fasc. 2.
- POLDERVAART A. (1955). — Zircon in rocks. *Amer. Journ. Sci.*, vol. 253, pp. 433-461.
- RAGUIN E. (1946). — Géologie du granite. *Masson, Paris*.
- RANKAMA K. et SAHAMA Th. B. — Geochemistry. *The University of Chicago, Illinois*.
- ROUBAULT M. (1958). — Géologie de l'uranium. *Masson, Paris*.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1955). — Sur les relations entre certains gîtes filoniens d'uranium et la présence d'inclusions radioactives dans les roches encaissantes. *C.R. Ac. Sci.*, t. 240, pp. 1248-1250.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1957). — Etude de la radioactivité du massif granitique de Carnac (Morbihan). *Congrès des Sociétés Savantes, Bordeaux*.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1957). — Sur la présence d'autunite de formation récente dans les granites altérés de la région Mallièvre-Les-Epesses (Vendée). *C.R. Ac. Sci.*, t. 245, pp. 101-103.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1958). — Etude de la répartition de la radioactivité et du plomb dans un cristal de zircon. *C.R. Ac. Sci.*, t. 246, pp. 137-140.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1958). — Observation de déplacement de l'uranium dans les roches cristallines. Relations possibles de ce phénomène avec la genèse de certains gisements. *Conf. Inter. de Genève*, vol. 2, pp. 335-337.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1958). — Sur une relation brusque de la radioactivité d'un massif granitique. *C.R. Ac. Sci.*, t. 246, pp. 3086-3089.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1958). — Sur une variation brusque et limitée de la radioactivité d'un massif granitique. *C.R. Ac. Sci.*, t. 246, pp. 3086-3089.

- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1959). — Influence de l'altération sur la répartition des éléments radioactifs dans les roches. *Congrès des Sociétés Savantes, Dijon*.
- TRITES A. F. Jr, and TOOKER E. W. (1953). — Uranium and thorium deposits in East-Central Idaho, Southwestern Montana. *Geological Survey Bull.*, 988-H.
- TURNER F. J., and VERHOOGEN J. (1951). — Igneous and Metamorphic Petrology. *Mc Graw-Hill, New-York*.
- WINCHELL A. (1951). — Elements of optical mineralogy, t. II. *John Wiley and Sons, New-York*.
- YAGODA H. (1949). — Radioactive measurements with nuclear emulsions. *Wiley, New-York and London*.
-

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté :

Le complexe pétrographique de la région d'Assouan (Egypte)

VU ET APPROUVÉ,

Nancy, le 1^{er} Juin 1959

Le Doyen de la Faculté des Sciences :

E. URION.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER,

Nancy, le 1^{er} Juin 1959

Le Recteur de l'Académie de Nancy :

G. MAYER.

SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES

2, rue René-d'Anjou
Tél. 53-48-52 - NANCY
